

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Desarrollo e integración de mano robótica antropomórfica en el robot humanoide TEO

Autora:
Jennifer Joana
GAGO MUÑOZ

Tutor:
Dr. Juan Carlos
GONZÁLEZ VÍCTORES

Co-tutor:
Álvaro
VILLOSLADA PECIÑA



Leganés, 19 de junio de 2018

Copyright ©2018. Jennifer Joana Gago Muñoz

Este documento está publicado bajo la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU. Todas las opiniones aquí expresadas son del autor, y no reflejan necesariamente las opiniones de la Universidad Carlos III de Madrid.



El trabajo desarrollado, disponible en el siguiente repositorio de GitHub <https://github.com/jgagom/Dextra/tree/dextraTPMG90>, está publicado bajo la licencia Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode> o envíe una carta a Creative Commons, 444 Castro Street, Suite 900, Mountain View, California, 94041, EE.UU.



El código vinculado a este documento está licenciado bajo la licencia GPL v3. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html> o envíe un correo electrónico a gnu@gnu.org.



Título: Desarrollo e integración de mano robótica antropomórfica en el robot humanoide TEO

Autor: Jennifer Joana Gago Muñoz

Tutor: Dr. Juan Carlos González Vítores

Co-tutor: Álvaro Villoslada Peciña

EL TRIBUNAL

Presidente:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Grado el día de de ... en, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias, en primer lugar, a mi tutor, Juan G. Vítores, por su trato, su infinita paciencia y su buena disposición a aconsejarme y ayudarme. Sin él este trabajo no habría sido posible.

A mis compañeros de universidad, en Madrid, en Edimburgo y en Lituania, por ayudarme a crecer y disfrutar más de mi etapa universitaria. A todos mis profesores, por todo lo aprendido. A la Universidad Carlos III de Madrid, por las oportunidades que me ha ofrecido.

A mis amigos, por acompañarme en tantas aventuras. A Markus y a Rytis, por hacerme sentir como en casa estando tan lejos. A Sonia y a María, en particular, por los paseos y las risas compartidas durante más de veinte años. A Celia, en especial, por sacar lo mejor de mí, por las largas conversaciones y por ser la mejor compañera de viaje.

A mi madre y a mi abuela, sobre todo, por ser un apoyo incondicional en mis años de vida. Por todo su tiempo, su cariño, su cuidado, los valores que me han transmitido y por haberme hecho ser la persona que soy a día de hoy, les estaré siempre agradecida.



Resumen

Este proyecto de fin de grado tiene como finalidad el desarrollo e integración de una mano robótica antropomórfica en el robot humanoide TEO. TEO es un robot asistente del hogar desarrollado en RoboticsLab, en la Universidad Carlos III de Madrid, cuyas manos robóticas actuales carecen de la funcionalidad necesaria para las tareas que requieren elevada destreza manual, como puede ser la manipulación de textiles.

Partiendo de esta motivación, el presente documento comienza con el planteamiento completo del problema y finaliza con la valoración de la solución aportada. El alcance de los objetivos propuestos se consigue mediante el desarrollo y estudio de varias versiones de la mano seleccionada a nivel mecánico, electrónico y software. Se desarrollan experimentos para evaluar la eficacia de la mano robótica. Adicionalmente, se evalúa el marco regulador técnico y el entorno socio-económico del proyecto, de modo que este atienda satisfactoriamente a las restricciones establecidas y se encaje correctamente en el contexto social y económico actual.

Estas páginas exponen el proceso completo de desarrollo e integración de las nuevas manos en el robot, lo cual forma parte de un proyecto que continuará de forma posterior a la defensa del trabajo, orientado a la ejecución de estudios adicionales en torno a su comportamiento en el humanoide, contemplando la expansión de las funciones de TEO en relación a la versatilidad que le aportan sus nuevas manos.

Palabras clave: Mano robótica, Antropomorfismo, Humanoide, TEO.

Abstract

This final degree project comprises the development and integration of an anthropomorphic robotic hand in the humanoid robot TEO. TEO is a household companion developed by RoboticsLab, at Carlos III University of Madrid, whose current robotic hands lack the necessary functionality for the tasks that require high manual dexterity, like fabric manipulation.

Based on this motivation, this document begins with the approach of the problem and ends with the evaluation of the solution provided. The scope of the proposed objectives is achieved through the development and study of several versions of the selected hand at the mechanical, electronic and software level. Multiple experiments are developed to evaluate the effectiveness of the robotic hand. In addition, the regulatory technical framework and the socio-economic environment of the project are evaluated, so that it complies satisfactorily with the established restrictions and adjusts to the current social and economic context.

These pages expose the complete development and integration process of the new hands, as part of a project that will continue after the defense of the work. The project is oriented to numerous additional studies around their behavior in the humanoid, contemplating the expansion of the TEO functions in relation to the versatility provided by his new fully functional hands.

Keywords: Robotic hand, Antropomorphism, Humanoid, TEO.

Índice general

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice de figuras	XIX
Índice de tablas	XXII
1. Introducción	1
1.1. Robot humanoide TEO	1
1.1.1. TEO como asistente del hogar	2
1.1.2. TEO y su función con textiles	2
1.1.3. Otras aplicaciones de TEO	4
1.2. Motivación: Planteamiento del problema	6
1.3. Estructura del documento	7
2. Estado del arte	9
2.1. Mecánica - Análisis funcional	9
2.1.1. La estructura funcional	10
2.1.2. Articulaciones y grados de libertad	12
2.1.3. Dedos: número, longitud y cinemática	14
2.1.4. Posición del pulgar	17
2.1.5. Destreza y taxonomías	18
2.2. Electrónica - Hardware	22
2.2.1. Actuadores	22
2.2.2. Sensores	26
2.2.3. Placas con microcontroladores	29
2.2.4. Integración de la electrónica	30
2.3. Software	31
2.3.1. Diseño y simulación	31

2.3.2.	Lenguajes de programación	34
2.3.3.	Entornos de desarrollo integrado	35
2.4.	Comparación de manos robóticas	38
2.4.1.	Lacquey Fetch Hand	39
2.4.2.	Manos seleccionadas para análisis	41
2.4.3.	Justificación de la solución	47
3.	Gestión del proyecto	49
3.1.	Marcos reguladores	49
3.1.1.	Marco regulador legal	49
3.1.2.	Marco técnico del proyecto	52
3.1.3.	Marco organizativo	54
3.2.	Entorno socio-económico	55
3.2.1.	Análisis del presupuesto	56
3.2.2.	Impacto socio-económico	57
3.3.	Estudio de viabilidad	60
3.3.1.	Análisis: Alcance del proyecto	61
3.3.2.	Definición de requisitos y enfoque	63
3.3.3.	Evaluación y revisión de la viabilidad	65
4.	Dextra original	67
4.1.	Mecánica - Análisis funcional	68
4.1.1.	Subactuación y grip adaptativo	69
4.1.2.	Posición de la mano para el agarre	70
4.1.3.	Estudio cinemático directo	71
4.2.	Electrónica - Análisis hardware	76
4.2.1.	Actuadores	76
4.2.2.	Sensores	77
4.2.3.	Control	78
4.2.4.	Circuito	78
4.3.	Software - Análisis interfaces humano-robot	79
4.3.1.	Interfaz GUI	79
4.3.2.	Interfaz de electromiografía (EMG)	80
5.	Dextra TPMG90-1	81
5.1.	Mecánica	81
5.1.1.	Variaciones en diseño mecánico	82
5.1.2.	Impresión y ensamblaje	84
5.1.3.	Mejoras para TPMG90-2	85
5.2.	Electrónica	86
5.2.1.	Teensy 3.2	86
5.2.2.	Montaje del circuito	86

5.2.3.	Mejoras para TPMG90-2	88
5.3.	Software	88
5.3.1.	<i>Middleware</i> YARP	88
5.3.2.	Mejoras para MGTP90-2	91
6.	Dextra TPMG90-2	93
6.1.	Mecánica	93
6.1.1.	Nuevo dorsal	93
6.1.2.	Muñeca y nueva palma	94
6.1.3.	Tercera falange y grip	96
6.1.4.	Mano izquierda	97
6.1.5.	Estudio cinemático directo	98
6.2.	Hardware	100
6.2.1.	Nuevos cables	100
6.2.2.	Placa de puntos e integración electrónica	100
6.2.3.	Alimentación de actuadores	102
6.2.4.	<i>Controller Area Network</i> (CAN) bus	104
6.3.	Software	106
6.3.1.	Adaptación <i>plug-ins</i> YARP	106
7.	Pruebas, experimentos y resultados	107
7.1.	Equipos utilizados	107
7.2.	Experimentos con Dextra TPMG90-1	107
7.2.1.	Pruebas puesta a punto	107
7.2.2.	Pruebas funcionamiento	109
7.3.	Experimentos con Dextra TPMG90-2	111
7.3.1.	Taxonomía de agarre de Cutkosky	112
7.3.2.	Taxonomía de manipulación de Bullock	115
7.3.3.	Pruebas de ejecución en TEO	118
7.3.4.	Prueba antropomorfismo	125
7.3.5.	Prueba CAN bus	134
7.4.	Comparación y conclusiones	135
8.	Conclusiones y líneas futuras	137
8.1.	Conclusiones	137
8.2.	Desarrollos futuros	138
	Bibliografía	141
	Apéndice A. Listados de componentes	149
	Apéndice B. Coste de materiales de Dextra Original	153

Apéndice C. Presupuesto desglosado del proyecto	155
Apéndice D. Esquemático circuito electrónico	161

Índice de figuras

1.1.	Robot humanoide TEO. ©RoboticsLab UC3M	1
1.2.	TEO - Tareas con textiles. ©RoboticsLab UC3M	3
1.3.	TEO sujetando un pincel. ©RoboticsLab UC3M	4
1.4.	TEO función de camarero. ©RoboticsLab UC3M	5
2.1.	Huesos y articulaciones de la mano, incluidos los músculos interóseos. [5]	10
2.2.	Ángulos de rotación alrededor de la muñeca. A, extensión (o dorsifle- xión); B, flexión (o flexión volar); C, flexión radial; D, flexión cubital. [5]	12
2.3.	Sección a través del radio, semilunar, carpal y la estructura ósea del dígito III: Centros virtuales de rotación de cada segmento sobre el si- guiente más próximo. Para la nomenclatura, ver tabla 2.1. [5]	12
2.4.	Modelo cinemático de una mano humana. [6]	13
2.5.	Representación gráfica de las medidas expuestas en la tabla 2.3	17
2.6.	Seis tipos básicos de prensión definidos por Schlesinger. De derecha a izquierda y de arriba a abajo: (1) Prehensión cilíndrica, (2) punta, (3) gancho, (4) palmar, (5) prehensión esférica y (6) lateral. [14]	18
2.7.	Términos importantes en la taxonomía de manipulación de Bullock. [7]	20
2.8.	Taxonomía de manipulación de Bullock. [7]	21
2.9.	Taxonomía de agarre de Cutkosky. [20]	22
2.10.	Principales sistemas de actuación. [21]	23
2.11.	Características de los actuadores rotatorios (1-10). [21]	24
2.12.	Características de los actuadores lineales (1-10). [21]	25
2.13.	Características de los sistemas de transmisión (1-10). [21]	26
2.14.	Principio de medición del sensor de efecto Hall. [24]	27
2.15.	Mano actual de TEO.	40
2.16.	Mano robótica UTAH / M.I.T. ©Computer History Museum	42
2.17.	Esquemático de la cinemática de la mano Utah/M.I.T. [12]	42
2.18.	Mano robótica Twendy-One. ©Sugano Laboratory	43
2.19.	Esquemático de la cinemática de la mano Twendy-One. [12]	43
2.20.	Mano robótica Elu 2. ©Elumotion Ltd	44

2.21. Esquemático de la cinemática de la mano Elu 2.	44
2.22. Mano robótica Robonaut 2. ©NASA	45
2.23. Esquemático de la cinemática de la mano Robonaut 2. [12]	45
2.24. Mano robótica Dextra. ©Álvaro Villoslada	46
2.25. Esquemático de la cinemática de la mano Dextra.	46
3.1. Diagrama elección de licencia Creative Commons adecuada	51
3.2. Generación del mes de abril del 2018. ©Red Eléctrica de España	58
3.3. Lienzo del modelo de negocio CANVAS.	60
3.4. Origen de fondos - Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. ©UC3M	62
3.5. Nuevos cables para conectar los encoders de la mano al circuito.	64
4.1. Diseño mano robótica Dextra.	67
4.2. Dedo modular de Dextra. ©Á. Villoslada	68
4.3. Corte transversal de falange media.	69
4.4. Taxonomía de agarre de Cutkosky - Dextra original. ©Á. Villoslada	70
4.5. Posición de índice y pulgar para agarre de punta.	71
4.6. Sistemas de referencia de mano original.	72
4.7. Dedo tipo “i”, “m”, “a” y “c” en ejes x e y para estudio cinemático directo.	74
4.8. Mano robótica Dextra sin palma, para estudio interior.	77
4.9. Encoders magnéticos acoplados a micro-motores Pololu HP 1000:1.	77
4.10. Regulación de voltaje de alimentación. ©Á. Villoslada	78
4.11. Interfaz GUI ©Á. Villoslada	79
5.1. Dextra TPMG90-1 - Problema con el servomotor TowerPro	82
5.2. Abductor original (izqda.) vs. abductor TPMG90-1 (dcha.)	83
5.3. Dextra TPMG90-1 - Piezas modificadas.	83
5.4. Componentes Dextra TPMG90-1	84
5.5. Ensamblaje completo. TPMG90-1 de frente con y sin dorsal, y de revés.	85
5.6. Soldadura de los encoders a los motores paso a paso.	87
5.7. Esquema ejemplo funcionamiento YARP en TEO.	89
5.8. Puertos YARP en las articulaciones de TEO. ©RoboticsLab	90
6.1. Esquema de la base exterior del sensor de fuerza de TEO, donde se acoplará la muñeca. ©RoboticsLab UC3M	94
6.2. Diseño CAD de piezas de la muñeca.	95
6.3. Palma de Dextra TPMG90-2 con pieza de muñeca.	95
6.4. Prueba de muñeca y palma de Dextra TPMG90-2 en TEO.	96
6.5. Nueva falange distal de Dextra TPMG90-2.	96
6.6. Dedos de Dextra TPMG90-2 con láminas antideslizantes de caucho.	97
6.7. Mano izquierda Dextra TPMG90-2.	97
6.8. Sistemas de referencia de Dextra TPMG90-2.	98
6.9. Nuevos cables para conectar los encoders de la mano al circuito.	100

6.10. Soldadura del circuito para Dextra TPMG90-2.	101
6.11. Electrónica completamente integrada en Dextra TPMG90-2.	101
6.12. Entradas y salidas del convertidor DC/DC. [85]	103
6.13. Configuración de circuito para aumentar el voltaje de salida. [85]	104
6.14. CAN IDs en TEO. ©RoboticsLab	105
6.15. Placa de control de CAN bus de manipulación.	105
6.16. Transceptor CAN WaveShare SN65HVD230.	106
7.1. Dextra TPMG90-1 - Test agarre objeto fino.	111
7.2. Posiciones de inicio para la descripción y análisis del movimiento. [87] .	112
7.3. Dextra TPMG90-2 - Taxonomía de Cutkosky [20]	113
7.4. Ejes de giro del brazo derecho de TEO. ©RoboticsLab	115
7.5. Taxonomía prensil en mano de Bullock. [7]	117
7.6. Pieza de adaptación (izqda.) y agarre de TPMG90-2 para plancha (izqda.).	119
7.7. TEO manipulando textiles con TPMG90-2.	120
7.8. Desarrollo de acción compleja: manipulación de cremallera.	121
7.9. Agarre de bandeja con gomaespuma.	123
7.10. Saludo informal (izqda.) y formal (dcha.) de TEO con TPMG90-2.	125
7.11. Obtención de volúmenes mediante FreeCAD.	127
7.12. Ejecución de prueba de fuerza de agarre con TPMG90-2.	129
7.13. Mecanismo interno del módulo de dedo.	130
7.14. Ángulos de posición de dedo extendido.	132
7.15. Ángulos de posición de dedo flexionado.	133
7.16. Ángulos de posición de pulgar extendido.	134
7.17. Conector CAN bus en TEO.	135
D.1. Esquemático Dextra Original	161
D.2. Esquemático Dextra TPMG90-1	162
D.3. Esquemático Dextra TPMG90-2	163

Índice de tablas

2.1.	Huesos y articulaciones de la mano y la muñeca reflejadas en la figura 2.1.	11
2.2.	Consideraciones generales para la selección del número de dedos. . . .	15
2.3.	Datos antropométricos de la población laboral española (diciembre 1996 - corregidos octubre 1999) Población: Conjunta [13].	16
2.4.	Comparación de sensores de proximidad.	29
2.5.	Manos robóticas diestras más relevantes de los últimos 50 años. [12][28]	38
2.6.	Pre-selección de manos robóticas en orden cronológico. [12] [28] [63] .	41
3.1.	Fechas para la evaluación de este proyecto. Convocatoria 2018.	54
3.2.	Costes totales del proyecto.	56
3.3.	Financiación de la investigación según tipo de actividad.	62
4.1.	Ángulos para agarre en punta de Dextra original.	71
4.2.	Parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg para dedos “i”, “m”, “a” y “c”.	73
4.3.	Parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg para dedo “p”.	73
4.4.	Valores de los parámetros de longitud de la figura 4.6	73
4.5.	Tabla de transformaciones para Dextra original	76
5.1.	Comparación servomotores Dextra original y TPMG90-1	81
5.2.	Tabla de especificaciones de tensión de componentes electrónicos. . . .	87
6.1.	Parámetros de longitud de la figura 6.8 para Dextra TPMG90-2.	99
6.2.	Tabla de transformaciones para Dextra TPMG90-2.	99
6.3.	Datos de consumo de los motores de Dextra TPMG90-2.	102
7.1.	Resultados de la prueba básica de movilidad.	110
7.2.	Agarres adicionales de Dextra TPMG90-2 - Taxonomía de Cutkosky. . .	114
7.3.	Evaluación de los agarres de la taxonomía de Cutkosky para TPMG90-2.	114
7.4.	Análisis y resultados, Taxonomía de Bullock con TPMG90-2.	116
7.5.	Tipos de manipulación sin contacto según la taxonomía de Bullock. . .	118
7.6.	Resultados de la prueba de agarre de textiles con TPMG90-2.	120

7.7.	Distintas configuraciones de pincel.	122
7.8.	Distintas configuraciones de agarre de bandeja sin gomaespuma.	124
7.9.	Comparación de mano humana con Dextra TPMG90-2. [8][13]	126
7.10.	Fuerza máxima en agarre de carga de motores e hilo en TPMG90-2.	128
7.11.	Fuerza de agarre distal máxima en TPMG90-2.	129
7.12.	Diámetros y velocidades angulares teóricas aproximadas del mecanismo del dedo de TPMG90-2.	131
7.13.	Velocidades angulares reales de la falange distal en los dedos de TPMG90-2.	132
7.14.	Ángulos de flexión de los dedos con tres falanges.	133
7.15.	Ángulos de extensión del pulgar desde posición vertical.	134
A.1.	Tabla de componentes de una unidad de mano Dextra TPMG90-1.	149
A.2.	Tabla de componentes de una unidad de mano Dextra TPMG90-2.	150
B.1.	Análisis de costes de la mano original por Á. Villoslada.	153
C.1.	Costes en personal del proyecto.	156
C.2.	Costes en equipos del proyecto.	156
C.3.	Costes en materiales del proyecto.	157
C.4.	Costes totales del proyecto.	159

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se indican las bases para comprender este proyecto, que consiste en el desarrollo y adaptación de una mano robótica antropomórfica en el robot humanoide TEO del grupo de investigación RoboticsLab de la Universidad Carlos III de Madrid.

1.1. Robot humanoide TEO

TEO (RH-2) es un robot humanoide de cuerpo completo que se desarrolla en RoboticsLab, en la Universidad Carlos III de Madrid (figura 1.1). Nació en 2012, y es la evolución de robots humanoides previos desarrollados en el mismo laboratorio, como el robot RH-1 y el RH-0. Todo el código utilizado en TEO es código abierto y está disponible en la plataforma GitHub¹.

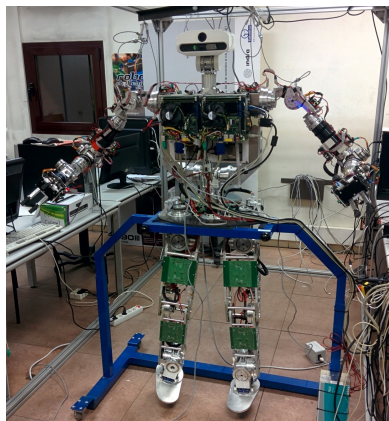


Figura 1.1: Robot humanoide TEO. ©RoboticsLab UC3M

¹GitHub. Roboticslab-uc3m/teo-main, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/teo-main>. [Accedido 17/01/2018]

Cuenta con 24 grados de libertad (GDL), dos manos subactuadas y varios sensores para proporcionar información sobre su entorno. Todos esos elementos están controlados por un total de 3 PC independientes, que se comunican mediante un middleware llamado YARP [1]. Esos PC ejecutan el software en control de la estabilidad del robot, las capacidades de manipulación y locomoción, así como otras tareas de mayor nivel².

En términos de la manipulación del robot, tema en el que se centra este proyecto, TEO presenta dos brazos 6 GDL, cada uno terminado en una mano de 3 dedos subactuados que ha servido para la realización de algunas tareas básicas. Cada brazo está equipado con un sensor de fuerza / par de torsión JR3 6D en la articulación de la muñeca para tener retroalimentación durante la manipulación. Con sus dos brazos, TEO puede realizar tareas similares a las que un humano podría realizar. Tanto los sensores como los motores de los brazos están controlados por un PC.

1.1.1. TEO como asistente del hogar

Existe una creciente demanda de robots capaces de ayudar a las personas en las tareas domésticas diarias. Algunas de estas tareas, especialmente las tareas relacionadas con los textiles (lavandería, planchado, etc.), son actualmente un gran desafío para los robots debido a las deformaciones y la gran cantidad de configuraciones posibles que la prenda puede adoptar. Un objetivo de la creación de TEO es desarrollar el primer asistente robot doméstico que pueda ayudar a las personas con este tipo de tareas.

Si bien trabajos conocidos sobre automatismos encargados de lavandería y planchado se centran en grandes máquinas para la ejecución de una sola tarea, TEO es un robot que se encarga de tareas como detectar arrugas, o modelos predefinidos para el reconocimiento de la prenda. El requisito clave para el laboratorio es que el proyecto pueda ser implementable en un escenario doméstico real, utilizando las mismas herramientas que usamos los humanos, sin ningún tipo de adaptación.

1.1.2. TEO y su función con textiles

TEO incluye tres funciones principales y consecutivas en su tarea de tratamiento de textiles. Para hacer frente a estas tareas, el robot recopila imágenes de una cámara incorporada en su cabeza, que genera una representación en 3D de alta resolución de la ropa y los demás objetos a tener en cuenta.

²RoboticsLab UC3M, Teo, the robot - Full-body humanoid robot, 2017. [En línea] Disponible en: <https://roboticslab-uc3m.github.io/robot-household-companion-web/teo.html>. [Accedido 17/01/2018]

■ Desdoblar

En la acción de desdoblar, encontramos la dificultad intrínseca de diferenciar tipos de ropa, cuando esta se encuentra deformada, y manipularla con precisión y delicadeza. Este proceso no parte de la comparación con otros modelos; el robot inspecciona la prenda y calcula las acciones de despliegue basándose su forma [2].

■ Planchar

En la fase de planchado (figura 1.2), TEO tiene que sujetar la plancha mediante una pieza impresa en 3D para dicho propósito, pues sus manos actuales no pueden realizar el agarre firme requerido para esta actividad. El algoritmo implementado obtiene una representación de nube de puntos del entorno de trabajo. Desde esta nube de puntos, la prenda se segmenta y se calcula un Descriptor Local de Arrugas (WiLD) personalizado para determinar la ubicación de las arrugas actuales [3]. El planchado requiere manipulación y control correcto de la plancha, ya que si se realiza incorrectamente puede crear más arrugas.

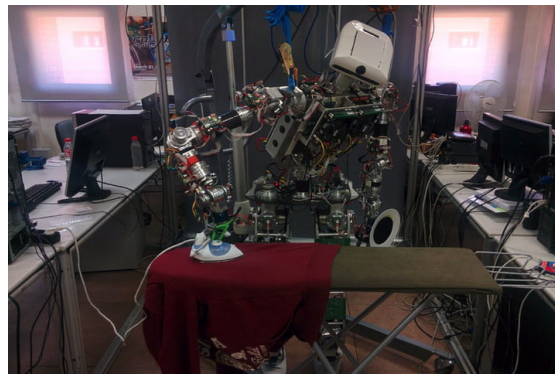


Figura 1.2: TEO - Tareas con textiles. ©RoboticsLab UC3M

■ Doblar

La fase final del proceso consiste en el doblado de la ropa para su posterior almacenamiento. Cada tipo de ropa tiene asociado una serie de operaciones para su plegado. La investigación en esta fase está abierta y centrada en que TEO pueda aprender a doblar la ropa sin la necesidad de contar con una secuencia de plegado predefinida ³.

³RoboticsLab UC3M, Robot Household Companion - Folding, 2017. [En línea] Disponible en: <https://roboticslabuc3m.github.io/robot-household-companion-web/folding.html>, [Accedido: 01-03-2018]

1.1.3. Otras aplicaciones de TEO

Más allá de la función con textiles, se ha experimentado el comportamiento de TEO ante otras tareas que implican manipulación.

■ TEO como pintor

La función de TEO con la pintura parte de un estudio de trayectorias evolutivas en línea para acciones continuas orientadas a objetivos en el mundo real.

En este proyecto, se desarrollan simulaciones mentales en un entorno de simulación. La simulación final es enviada a TEO, quien ejecuta la pintura pertinente mediante la estrategia OET [4]. Para ello, es necesario que pueda ejecutar un agarre compatible con el manejo del pincel o de la brocha, según el caso. Dado que esto es imposible con las manos actuales de TEO, estos experimentos se han llevado a cabo extrayendo la mano robótica del humanoide y realizando la sujeción con un mecanismo improvisado.

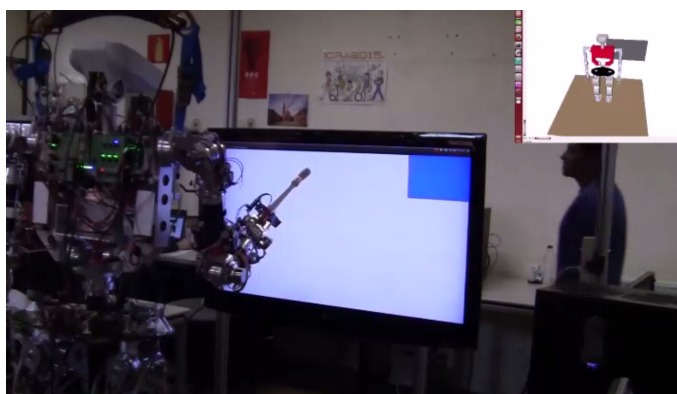


Figura 1.3: TEO sujetando un pincel. ©RoboticsLab UC3M

■ TEO como camarero

La función de TEO como camarero⁴ encaja en su marco funcional de asistente del hogar. Mediante instrucciones básicas emitidas por voz, el humanoide se encarga de servir aquello que tenga apoyado sobre una bandeja circular acoplada a su brazo izquierdo.

El objetivo óptimo es que esta tarea pueda realizarse con objetos que requieren una manipulación precisa, como son recipientes rellenos de líquidos o platos con

⁴GitHub, Roboticslab-uc3m/waiter, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/waiter>. [Accedido: 14-02-2018]

comida. La prueba principal en TEO se realizó con un recipiente cilíndrico (ver figura 1.4), pues las manos de tres dedos no permiten un desarrollo de la multiplicidad de agarres necesarios para manipular objetos más delicados.

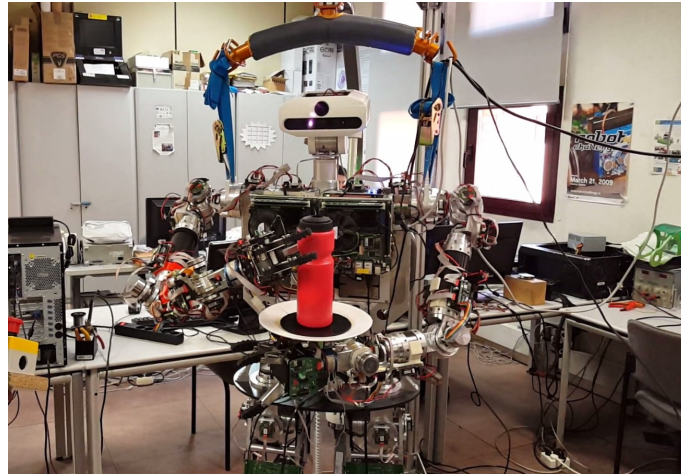


Figura 1.4: TEO función de camarero. ©RoboticsLab UC3M

Una acción derivada de la función de camarero es probar la capacidad de TEO de portar de forma estable una bandeja de dos asas. Las manos actuales no permiten un correcto agarre, por lo que se ha necesitado adaptar la bandeja a sus necesidades, añadiendo gomaespuma en las asas para modificar el agarre. Uno de los principios fundamentales de la creación de unas nuevas manos para este humanoide es que este sea capaz de poder adaptarse a su entorno, y no al revés. Las nuevas manos deberán desenvolverse con los objetos cotidianos como esta bandeja de manera satisfactoria.

■ TEO como robot social

Puesto que, en el entorno del hogar, un robot se desenvuelve en el mismo espacio que seres humanos, es fundamental que pueda reconocerlos y relacionarse con ellos de un modo correcto.

La aplicación '*follow-me*'⁵, desarrollada por RoboticsLab, consiste en un programa de reconocimiento y seguimiento facial, acompañado de un saludo, agitando sus brazos. TEO podría desarrollar distintos tipos de saludos y comunicarse con mayor eficacia si contase con unas manos antropomórficamente correctas.

⁵GitHub. Roboticslab-uc3m/follow-me, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/follow-me>. [Accedido: 14-02-2018]

1.2. Motivación: Planteamiento del problema

La motivación para realizar este proyecto es la de dotar al robot humanoide TEO de unas manos de proporciones humanas, completamente adaptadas y funcionales, con las que pueda realizar de manera eficaz y eficiente las tareas del hogar mencionadas con anterioridad.

Trabajar con textiles, en concreto, es una tarea especialmente compleja para una mano robótica. Son objetos, por lo general, delicados y de grosor reducido, que requieren una alta precisión para su manipulación. Además, para procesos como el de planchado, se necesita contar con una mano con gran capacidad adaptativa, capaz de soportar el peso de una plancha.

Las manos a sustituir de TEO, sobre las que se profundiza en el capítulo de estado del arte, presentan numerosas limitaciones. Se trata de unas manos de tres dedos poco antropomórficas, demasiado subactuadas y de actuación pasiva. Esto reduce el potencial y la funcionalidad del robot en la multiplicidad de tareas para las que está diseñado.

El objetivo principal de este trabajo es, por tanto, el de desarrollar una mano robótica, bien partiendo de cero, o de un modelo preexistente, y realizar las mejoras necesarias para adaptarla a TEO cumpliendo con los requisitos que se estudiarán en el capítulo 2, que parten de las siguientes premisas:

- **Mano antropomórfica**, para que pueda adaptarse de un modo correcto a los distintos escenarios de manipulación en el hogar.
- **Grados de libertad y de actuación** adecuados, que no limiten el movimiento y permitan que la mano realice acciones de forma similar a una mano humana.
- **Fuerza adecuada al contexto de asistente del hogar**, para que sea capaz de operar con herramientas presentes en el entorno doméstico.
- **Integración electrónica**, para que la mano pueda ejecutar instrucciones con mayor comodidad y sin limitaciones en su movimiento.
- **Articulaciones sin holgura**, para lograr una precisión adecuada y movimientos firmes y certeros.
- **Facilidad de montaje y modificación**, para poder reproducirla libremente y alterar aquellos aspectos que necesiten un cambio para su adaptación.
- **Bajo coste**, para poder permitir experimentos de prueba y error contando con la posibilidad de reposición de componentes asequibles, así como para permitir la

reproducción de varias versiones de la mano.

Estos requisitos se estudiarán en profundidad en el capítulo *Estado del Arte* donde, además, se añadirán nuevos objetivos deseables tras un estudio de la mecánica, la electrónica y el software más destacable de la tecnología actual aplicada a manos robóticas.

1.3. Estructura del documento

A continuación y para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo numerado.

- El **capítulo 1**, *Introducción*, se centra en el contexto en el que se desarrolla este proyecto, mediante la descripción las funciones y especificaciones generales de TEO. Se describe la motivación para realizar el presente proyecto.
- El **capítulo 2**, *Estado del Arte*, describe el estado actual y los avances en el campo de la robótica aplicada a las prótesis de manos, a nivel mecánico, electrónico y software. Se muestra una selección de manos para estudio y se justifica la solución escogida.
- El **capítulo 3**, *Gestión del proyecto*, expone los marcos reguladores del presente proyecto, además de los detalles de los presupuestos, un estudio socio-económico y de la viabilidad del proyecto.
- El **capítulo 4**, *Dextra Original*, enfoca su contenido en exponer de forma exhaustiva los detalles de la mano Dextra original, para facilitar el trabajo posterior.
- El **capítulo 5**, *Dextra TPMG90-1*, expone los detalles de la mano Dextra TPMG90-1 de forma exhaustiva, una adaptación de Dextra original para introducir el servomotor TowerPro MG90, más disponible en el mercado. Se detallan las modificaciones realizadas a nivel mecánico, electrónico y software.
- El **capítulo 6**, *Dextra TPMG90-2*, recoge todas las mejoras implementadas en la mano Dextra para su optimización y adaptación definitiva al robot TEO. Se desglosa este análisis en mecánica, electrónica y hardware.

- El **capítulo 7**, *Pruebas, experimentos y resultados*, muestra los experimentos realizados tanto para probar la viabilidad de las versiones de la mano robótica, como para demostrar su destreza, versatilidad y eficacia en su campo de trabajo.
- El **capítulo 8**, *Conclusiones y líneas futuras*, incluye una valoración final del proyecto en relación a los objetivos conseguidos, las conclusiones extraídas de la realización del proyecto y las líneas futuras que se prevean para este.

Capítulo 2

Estado del arte

Esta sección, como base sobre la que se sustenta el proyecto, parte de las características fundamentales requeridas para la mano del robot humanoide TEO, con el propósito de acotar el campo de conocimiento sobre el que se quiere centrar el marco teórico de este trabajo. Se concluye el capítulo con una descripción de la selección de manos robóticas que son de particular relevancia para el objetivo deseado.

2.1. Mecánica - Análisis funcional

Un robot humanoide es un robot contemplado para guardar semejanza con la estructura y los movimientos de un ser humano, por lo tanto es importante que sus manos se asemejen a las manos humanas.

La utilización de unas manos antropomórficas tiene fines funcionales. Dado que TEO está pensado para ser un asistente del hogar y, por ello, para desenvolverse en entornos humanos, es fundamental que sus formas le permitan interactuar con herramientas cotidianas y que pueda manipularlas de un modo ordinario. Por lo tanto, es conveniente analizar las características anatómicas de la mano humana para un correcto análisis funcional.

Como se explica en la introducción del proyecto, la labor de TEO con materiales textiles es una tarea delicada que precisa de un estudio completo de las amplitudes de movimiento de la mano y el rendimiento de agarre. Las capacidades de agarre y manipulación de las manos son principalmente una cuestión de cinemática.

Por consiguiente, a continuación se presentan los aspectos fundamentales del diseño cinemático de una mano robótica, tras un análisis estructural de la mano humana.

2.1.1. La estructura funcional

En el marco de las estructuras de la mano (huesos, tendones, músculos, nervios y ligamentos), la estructura ósea es elemento de estudio primordial del que debe partir el análisis funcional de la misma, pues en ella se basa, en gran medida, el diseño mecánico de la mano robótica antropomórfica.

Los huesos de la mano, mostrados en la figura 2.1, se agrupan en el carpo, que comprende ocho huesos que forman la muñeca y la raíz de la mano, y los dedos, cada uno compuesto por sus segmentos metacarpianos y falangianos (tabla 2.1). Los huesos del carpo están dispuestos en dos filas, los de la fila más proximal se articulan con radio y cúbito. Entre los dos está la articulación intercarpiana [5].

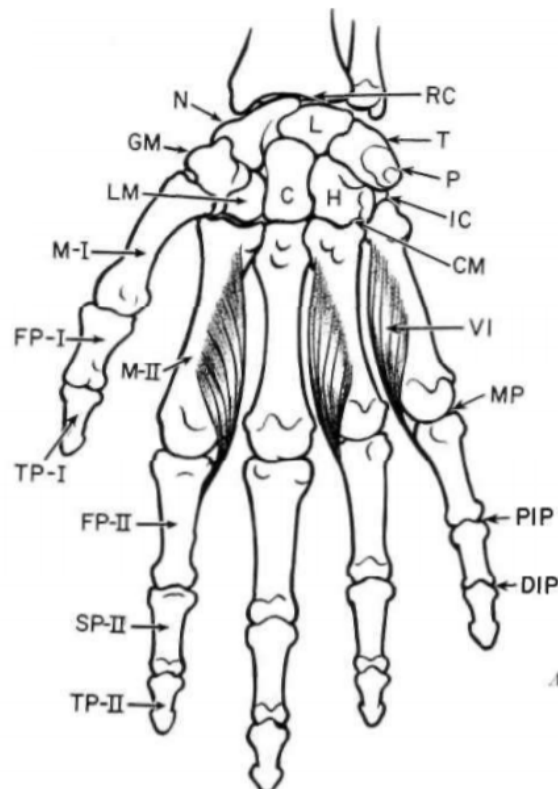


Figura 2.1: Huesos y articulaciones de la mano, incluidos los músculos interóseos. [5]

La conformación ósea y las uniones de ligamentos son tales que evitan las traslaciones laterales y dorsal-volar, pero permiten la participación en los movimientos mayores de la muñeca (ver figura 2.2). En cada uno de los dígitos, el diseño anatómico es esencialmente el mismo, con excepciones en el pulgar. Los metacarpianos II a V se

Tabla 2.1: Huesos y articulaciones de la mano y la muñeca reflejadas en la figura 2.1.

Huesos del carpo	
GM	Multangular mayor
N	Navicular
L	Seminular
T	Piramidal
P	Pisiforme
LM	Multangular menor
C	Carpal
H	Hamate
Huesos metacarpianos	
M-I, II, III, IV, V	
Primera serie de falanges	
FP-I, II, III, IV, V	
Segunda serie de falanges	
SP-II, III, IV, V	
Tercera serie de falanges	
TP-I, II, III, IV, V	
Articulaciones	
RC	Radiocarpal
IC	Intercarpal
CM	Carpometacarpal
MP	Metacarpophalangeal
PIP	Proximal interfalángica
DIP	Distal interfalángica

articulan tan estrechamente con los huesos carpianos adyacentes de la fila distal que, aunque son capaces de cierta flexión y extensión, la independencia del movimiento es muy limitada. Los ejes metacarpianos están arqueados para formar la palma, y los extremos distales son casi hemisféricos para recibir la curvatura cóncava de los extremos proximales de las primeras falanges.

La articulación metacarpofalángica muestra un patrón visto también en las articulaciones interfalángicas. Como se muestra esquemáticamente en la figura 2.3, el centro virtual de rotación se encuentra casi en el centro de curvatura del extremo distal del miembro proximal. Los laterales de las superficies de la articulación se estrechan y se unen con los ligamentos, de modo que la rotación lateral es pequeña en las articulaciones metacarpofalángicas y falta por completo en las articulaciones de la falange. Por lo tanto, estos últimos son articulaciones de bisagra típicas. El pulgar se diferencia de los otros dígitos, primero, en que falta la segunda falange y, segundo, en que hay una mayor movilidad en la articulación carpometacarpiana.

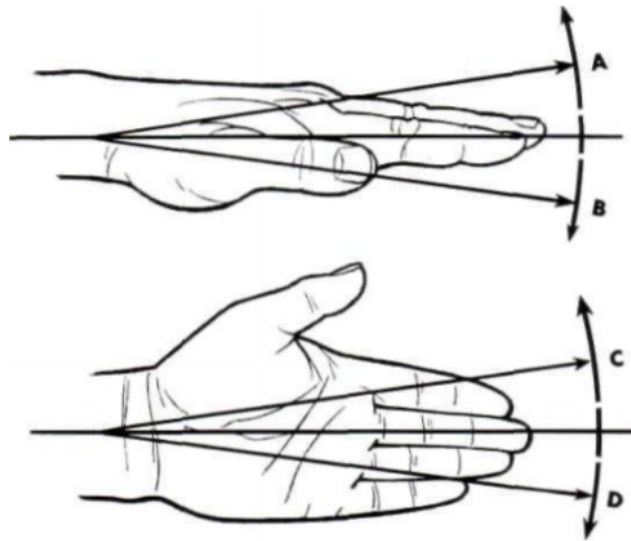


Figura 2.2: Ángulos de rotación alrededor de la muñeca. A, extensión (o dorsiflexión); B, flexión (o flexión volar); C, flexión radial; D, flexión cubital. [5]

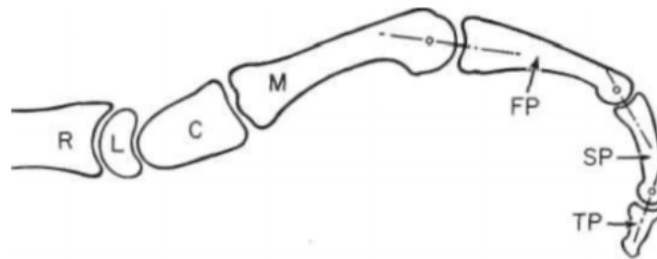


Figura 2.3: Sección a través del radio, semilunar, carpal y la estructura ósea del dígito III: Centros virtuales de rotación de cada segmento sobre el siguiente más próximo. Para la nomenclatura, ver tabla 2.1. [5]

2.1.2. Articulaciones y grados de libertad

Partir de un modelo cinemático preciso de la mano es una garantía para lograr un diseño eficaz. Conseguir un modelo completo de huesos, músculos y tendones es una tarea muy compleja, por lo que lo habitual es partir de modelos simplificados. Comúnmente, tales modelos consisten en cadenas en serie con articulaciones mecánicas, y su cinemática es bastante adecuada para modelar el movimiento del esqueleto.

El modelo cinemático de la mano humana con respecto al antebrazo se concibe como un árbol cinemático, cuyo nodo raíz consiste en el eje cartesiano de referencia “B” y cuyas hojas son los ejes fijados a las falanges distales de los cinco dedos, como se muestra en la figura 2.4. Las cinco trayectorias hacia las falanges distales tienen un segmento común a través de la articulación de la muñeca, centrado en el punto “W” y luego ramificado desde el MC2 (hueso metacarpiano del índice) como cadenas cinemáticas en serie.

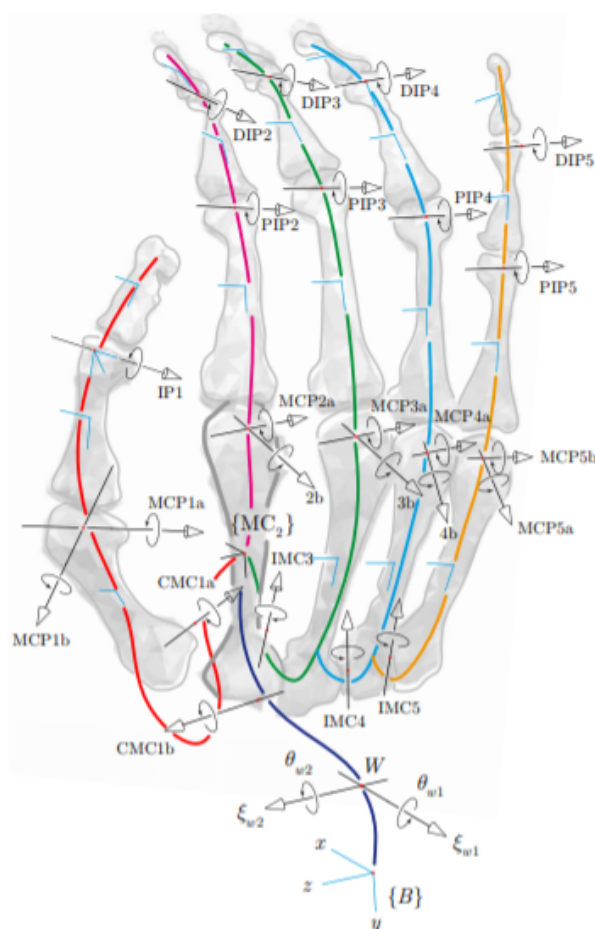


Figura 2.4: Modelo cinemático de una mano humana. [6]

Existen modelos muy avanzados que intentan reproducir la cinemática de la mano humana de la forma más precisa posible, como es el caso del modelo de 22 grados de libertad (GDL) presentado en [6], que consigue reconstruir la postura de la mano, sin que la piel se mueva relativamente a los huesos, según los datos de los marcadores ópticos. El modelo de movimiento de la piel se logra incorporar en un modelo de mano

cinemática 26 GDL. Un enfoque similar se puede conseguir con un modelo de 29 GDL (23 + posición y orientación de la mano), mediante calibración geométrica estática y la estimación lineal del estado para recuperar ángulos de articulación.

Se estima que cada una de nuestras manos (sin tener en cuenta la muñeca) tiene un número de grados de libertad controlables igual a veintiuno [7] o veintidós [8], según la fuente. El número de grados de libertad controlables que posea una mano robótica debe estar justificada, principalmente, por la exigencia de las tareas a realizar por el robot. En el caso de las manos de TEO, es fundamental que la mano tenga una libertad de movimiento que le permita operar con objetos de muy distintas características que pueden encontrarse en el espacio del hogar, por lo que se establece como requisito mínimo que la mano seleccionada supere los grados de libertad de la mano a reemplazar y se valora positivamente su aproximación al número de grados de libertad controlables anunciado.

Es necesario estudiar el grado de actuación, para decidir de qué modo se va a mover la mano en sus grados de libertad. Existe la posibilidad de que cada articulación de la mano se pueda mover de forma independiente, si esta está completamente actuada, o de estudiar si es posible reducir el número de actuadores sin sacrificar las prestaciones de esta, y seleccionar una mano subactuada.

La principal ventaja de utilizar una mano completamente actuada es que las posibilidades de manipulación son mayores que en una mano subactuada, ya que la subactuación suele permitir movimientos de recoger y colocar (*pick and place*) más o menos precisos en relación a su grado de subactuación, pero no permite tareas de manipulación en la propia mano (*in-hand*) [9]. La subactuación, por otra parte, se presenta como una característica deseable, dado que utilizando menos actuadores podemos disminuir el peso y el tamaño de la mano, lograr un menor consumo energético, una simplificación del diseño mecánico y una menor cantidad de parámetros a controlar. Es importante que la subactuación no sea excesiva, ya que esto se traduce en una pérdida de control y precisión de los movimientos que esta produce [10][11].

2.1.3. Dedos: número, longitud y cinemática

Algunas manos robóticas, como las manos modulares, tienen dedos de igual longitud y cinemática. Si bien simplifica el diseño, reduce costes y facilita su mantenimiento, se puede sacrificar el rendimiento del robot.

De forma previa a seleccionar el número de dedos idóneo para una mano robótica que imite en forma y movimiento a la mano humana, es fundamental tener en consideración que el dedo pulgar humano difiere del resto de los dedos de la mano en

términos de cinemática, tamaño y fuerza. Un ejemplo de esto es la articulación de la base del pulgar humano, que permite un rango de movimiento mucho más grande que los demás dedos con respecto a la abducción / aducción y proporciona una rotación hacia adentro / hacia afuera del pulgar. Estas dos características de esta articulación son esenciales para la oposición del pulgar y la capacidad de realizar una manipulación precisa [12]. Por ello, es importante que uno de los dedos de la mano se distinga de los demás para cumplir la función del pulgar, mientras que los demás pueden ser modulares sin interferir en el antropomorfismo.

Es importante tener en cuenta que reducir la cantidad de dedos de forma lógica puede ser una decisión positiva, ya que cada dedo innecesario agrega costos y complica el control. Por otra parte, conviene analizar las tareas para las que está programado el robot para concluir el número de dedos necesarios para desarrollarla de forma eficaz y precisa. De forma intuitiva, se presenta la siguiente clasificación (tabla 2.2), en la que se relaciona el número de dedos (de dos a cinco dedos) con el tipo de agarre.

Tabla 2.2: Consideraciones generales para la selección del número de dedos.

N.º de dedos	Características principales
2 (1 pulgar + 1 dedo)	Dos puntos de contacto con el objeto. Permite agarre en punta. Dificultad en agarres esféricos. Se puede aumentar la superficie de contacto para un mejor agarre.
3 (1 pulgar + 2 dedos)	Se requieren al menos tres dedos cuando se desea controlar la orientación del objeto o si se necesita sujetar con precisión objetos esféricos.
4 (1 pulgar + 3 dedos) ó 5 (1 pulgar + 4 dedos)	Se ha de considerar cómo de delicados son los objetos que se van a manipular. Agregar más puntos de contacto permite reducir la fuerza de contacto en cada punto, al aumentar el área de la superficie sobre la cual actúa la fricción. De este modo se consiguen fuertes “agarres de poder” (<i>power grasps</i>) .

La experiencia con las manos de tres dedos de TEO nos exige orientar la selección hacia manos de mayor cantidad de dedos. Tal y como se expone en la tabla 2.2, la elección de 4 ó 5 dedos depende principalmente de la necesidad del agarre. Dado que los horizontes de alcance de las tareas de TEO no están delimitados y, en el espacio del hogar es esperable que el robot tenga que enfrentarse a una multiplicidad de tareas similar a la que se enfrenta un ser humano en su día a día, es deseable que la mano se parezca lo máximo posible a una mano humana. Concluido esto, se estudiarán única-

mente manos de 4 ó 5 dedos, valorando en partes iguales los puntos de contacto que ofrecen los dedos como el número de dedos.

Con el propósito de utilizar modelos de manos robóticas que se asemejen en dimensiones a las medidas estándar humanas, se toma como referencia un estudio estadístico de datos antropométricos de la población laboral española de 1999, realizado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) destinado a un proyecto a escala nacional (tabla 2.3).

Tabla 2.3: Datos antropométricos de la población laboral española (diciembre 1996 - corregidos octubre 1999) Población: Conjunta [13].

Designación	Tamaño muestra (mm)	Media (mm)	Desviación típica (mm)	Error típico (mm)
[A] Longitud de la mano	1719	182.94	11.88	0.287
[B] Anchura de palma (metacarpianos)	1719	85.29	7.86	0.190
[C] Longitud del dedo índice	1378	72,00	5.13	0.138
[D] Anchura proximal dedo índice	1722	19.88	1.99	0.048
[E] Anchura distal dedo índice	1723	17.29	2.03	0.049

En el esquema que se expone en la figura 2.5, se puede observar de modo simplificado la media de las principales medidas de una mano humana (sin tener en cuenta el género de la persona que proporciona la muestra). Se mantiene la preferencia por manos de proporciones humanas, de unas dimensiones que disten de forma razonable de la media expuesta en la tabla 2.3.

Usualmente, las manos robóticas contemplan la zona de la palma y el dorsal como un cuerpo sólido inmóvil, obviando los huesos del carpo y los huesos metacarpianos y focalizando el mecanismo del agarre en los dedos. Es, por lo tanto, un requisito fundamental que el dedo pulgar de la mano robótica antropomórfica cuente con un equivalente a la falange distal y proximal, y que el resto de dedos estén formados por tres piezas equivalentes a la falange distal, media y proximal.



Figura 2.5: Representación gráfica de las medidas expuestas en la tabla 2.3

2.1.4. Posición del pulgar

Es un aspecto a tener en consideración que el pulgar pueda oponerse y enfrentarse con, al menos, un dedo, para garantizar el buen desarrollo de ciertos tipos de agarre, siendo en este proyecto en particular una tarea fundamental el lograr el agarre de punta.

La versatilidad del pulgar radica, primero, en la variedad de sus patrones de extensión de flexión y, en segundo lugar, en el plano rotativo ajustable en el que puede tener lugar la flexión-extensión [12]. El primero de estos es directamente análogo al sistema digital para los otros cuatro dedos, en el sentido de que para cualquier posición metacarpiana dada hay numerosas posiciones posibles de las falanges.

El segundo efecto se debe a la movilidad relativa de la articulación carpometacarpiana, que permite que el pulgar actúe en cualquier plano necesario para oponerse a las puntas de los dedos. Las principales oposiciones son semidirectas, como se ve en palmar, punta y prehensiones esféricas (ver figura 2.6). En realidad, en estos casos, el plano de la acción del pulgar está inclinado de 45 a 60 grados respecto del plano palmar. En la prensión lateral, el plano es aproximadamente paralelo a este plano.

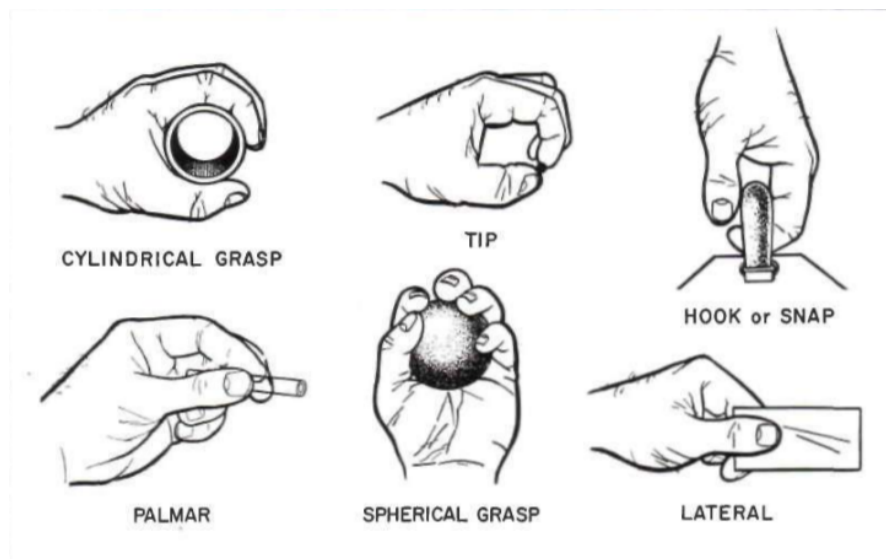


Figura 2.6: Seis tipos básicos de prensión definidos por Schlesinger. De derecha a izquierda y de arriba a abajo: (1) Prehensión cilíndrica, (2) punta, (3) gancho, (4) palmar, (5) prehensión esférica y (6) lateral. [14]

La posición del pulgar con relación al resto de la mano debe ajustarse a su longitud. Si no lo hace, el rendimiento de agarre y manipulación de la mano se puede ver afectado. Si el pulgar es demasiado largo o la base del pulgar está demasiado cerca de las articulaciones de los dedos, las yemas de los dedos y el pulgar solo pueden entrar en contacto con un objeto ubicado alejado de la palma. Esto requiere un movimiento extenso de muñeca o codo para lograr una posición y orientación adecuadas de la mano. Además, el rendimiento de agarre de estas manos es bastante bajo, ya que los dedos no pueden cerrarse alrededor del objeto correctamente. Por otro lado, un pulgar demasiado corto o demasiado alejado de las articulaciones, como es el caso de las manos de los primates, permite un agarre de potencia muy efectivo pero dificulta la manipulación de los objetos ubicados lejos de la palma o demasiado pequeños. La posición longitudinal del pulgar no es el único criterio importante para el diseño de la mano. Un pulgar colocado hacia el centro o muy cerca de la palma, podrá empujar contra superficies planas, pero empeora la oposición del pulgar y el agarre de fuerza de objetos grandes.

2.1.5. Destreza y taxonomías

La destreza, *dexterity*, o manipulación diestra, es un término frecuentemente utilizado en los documentos de investigación relacionados con manos robóticas antropomórficas. La necesidad de aparición de este concepto surge de la complejidad de los

movimientos de manipulación, pues la mayoría de tareas diestras en mano involucran el esfuerzo de múltiples dedos y, por lo tanto, de un elevado número de grados de libertad.

Una tarea de manipulación se puede descomponer de varias formas diferentes, dependiendo en aquello en lo que se centre [7]. Por lo tanto, tenemos vistas centradas en el objeto o en el entorno, y vistas centradas en la propia mano. La diferencia entre ambas se puede explicar mediante una tarea sencilla como abrir una botella: una vista centrada en el objeto prescribiría un movimiento de rotación del tapón a lo largo del eje principal del recipiente, combinado con una fuerza a lo largo de ese eje para levantar la tapa; pero una perspectiva centrada en la mano, se centraría en la serie de movimientos diestros del pulgar y el índice con movimientos dentro de la mano, a través de un agarre de fuerza del tapón y del movimiento de varias articulaciones del brazo.

Varios documentos presentan o utilizan una definición de destreza que varía considerablemente de uno a otro. De acuerdo con algunos de ellos, la destreza es:

- “Capacidad de cambiar la posición y la orientación del objeto manipulado de una configuración de referencia dada a una diferente, arbitrariamente elegida dentro del espacio de trabajo de la mano”, Bicchi, 2000 [15].
- “Proceso de manipular un objeto de una configuración de agarre a otra”, Li, 1989 [16].
- “Cuando múltiples manipuladores, o dedos, cooperan para agarrar y manipular objetos”, Okamura, 2000 [17].
- “Extensión cinemática sobre la cual un manipulador puede alcanzar todas las orientaciones”, Klein y Blaho, 1987 [18].
- “Habilidad en el uso de las manos”, Sturges, 1990 [19].

Dentro de estas definiciones de destreza, la que más se identifica con el término deseado para este proyecto es una combinación entre la descripción general de Sturges y la descripción más técnica de Okamura. Se desea obtener una mano que posea la habilidad de usar sus dedos, ayudada de los movimientos de la muñeca y de los brazos, para agarrar y manipular objetos.

La taxonomía de manipulación y de agarre es una buena herramienta para evaluar la destreza de las manos robóticas. Se trata de una clasificación científica para ordenar, de forma jerárquica y sistemática, los diferentes grupos de posiciones de la mano destinadas a estos fines. A continuación se describen las dos taxonomías relacionadas con manos robóticas más populares entre la comunidad científica, las llamadas taxonomías

de Cutkosky y de Bullock. Se podría decir que la taxonomía de Bullock está centrada en la mano, mientras que la taxonomía de Cutkosky está centrada en el objeto. Para comprender la taxonomía de manipulación Bullock, es necesario familiarizarse con los términos que se exponen en la figura 2.7.

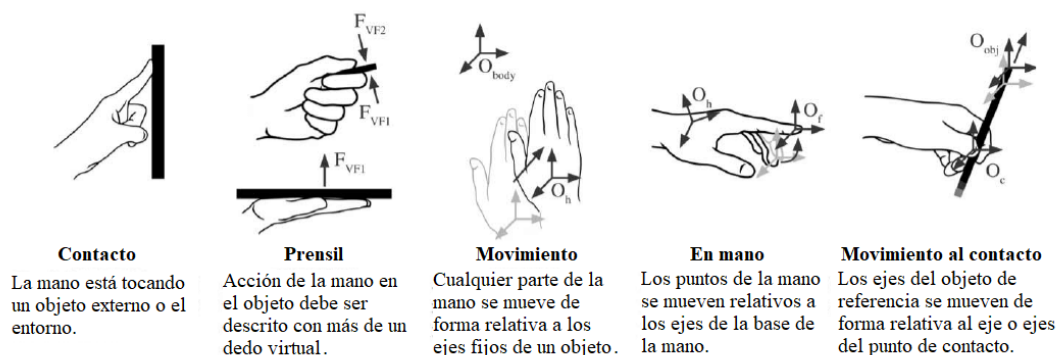


Figura 2.7: Términos importantes en la taxonomía de manipulación de Bullock. [7]

La figura 2.8 presenta la taxonomía de manipulación de Bullock con los términos definidos en la figura 2.7. Las subclases presentadas están destinadas a aplicarse a movimientos de manos instantáneos, en lugar de secuencias de tiempo más largas. Esta taxonomía se centra en lo que está haciendo la mano durante la ejecución de la tarea de manipulación pues, como dijimos, está centrada en la mano.

Bullock incluye también una taxonomía más detallada de la rama de manipulación prensil en mano, en la que se analizan los movimientos de rotación y traslación de los diferentes ejes cartesianos (consultar [7] para más información). Esta taxonomía no es fundamental para este estudio, mas se considera como un elemento que puede dar un valor añadido a nuestra mano, por lo que se tendrá en consideración en caso de indecisión entre manos de similares prestaciones.

La taxonomía de agarre de Cutkosky (ver figura 2.9), como su propio nombre indica, difiere de la de Bullock principalmente en que no contempla el movimiento de los objetos, tan solo los distintos tipos de sujeción. En relación a los diferentes tipos de agarre, la taxonomía de Cutkosky resulta más completa, pues contempla agarres como la pinza lateral y otorga importancia a los diversos tipos de forma que pueden tener los objetos a sujetar y el número de dedos implicados en la acción.

Si bien la taxonomía de Cutkosky es sin duda una herramienta útil para clasificar y comparar los agarres de fabricación, adolece de una serie de limitaciones. Para empezar, está incompleto. Por ejemplo, hay numerosos agarres cotidianos, como el agarre que

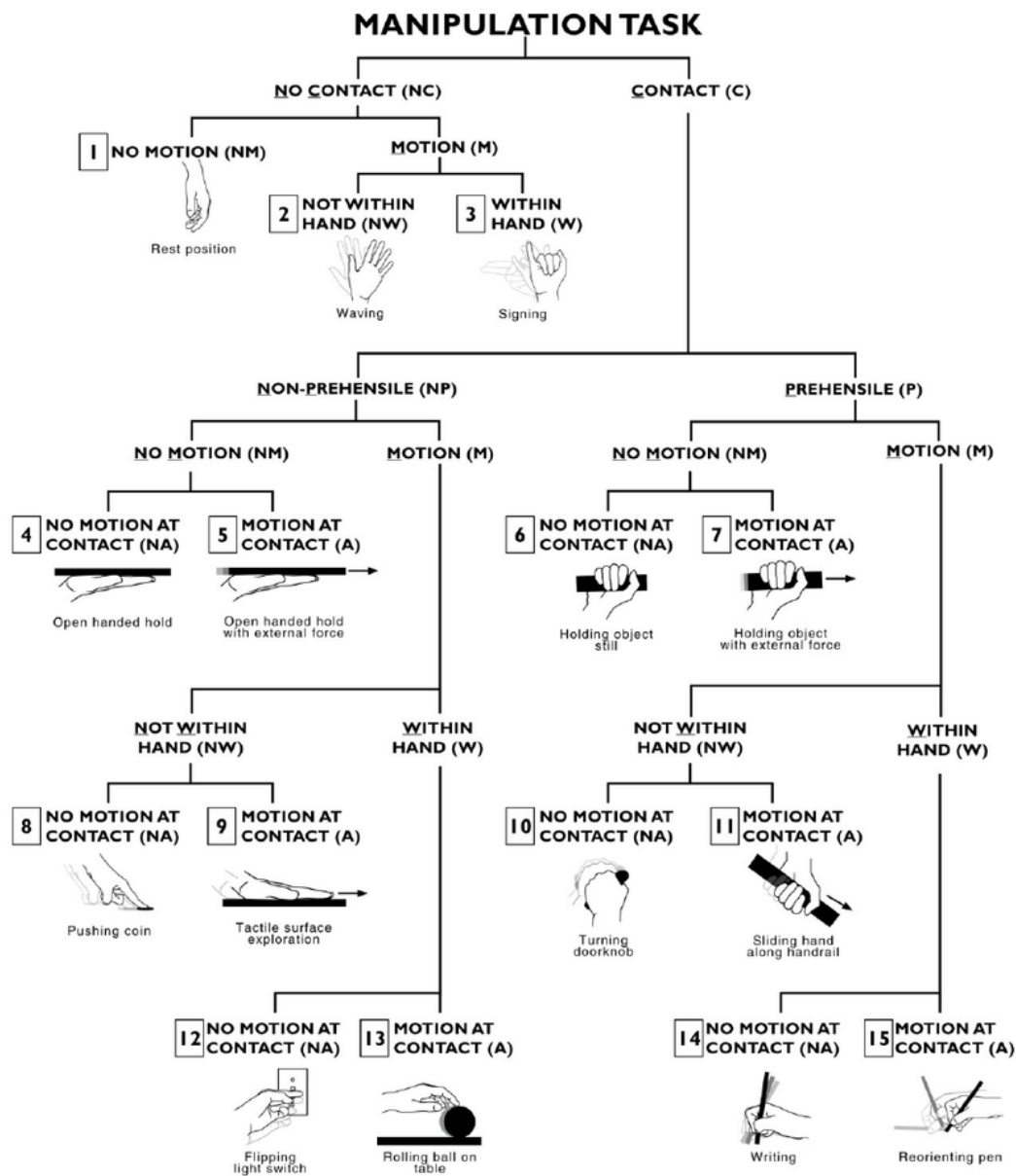


Figura 2.8: Taxonomía de manipulación de Bullock. [7]

las personas usan al escribir con un lápiz o marcar objetos con un punzón que no están incluidos, y deberían considerarse [20]. Es deseable que la mano robótica seleccionada para este proyecto pueda realizar el mayor número de posiciones de manipulación o agarre de ambas taxonomías, así como de los movimientos específicos que conciernan a la tarea para la que se concibe al humanoide.

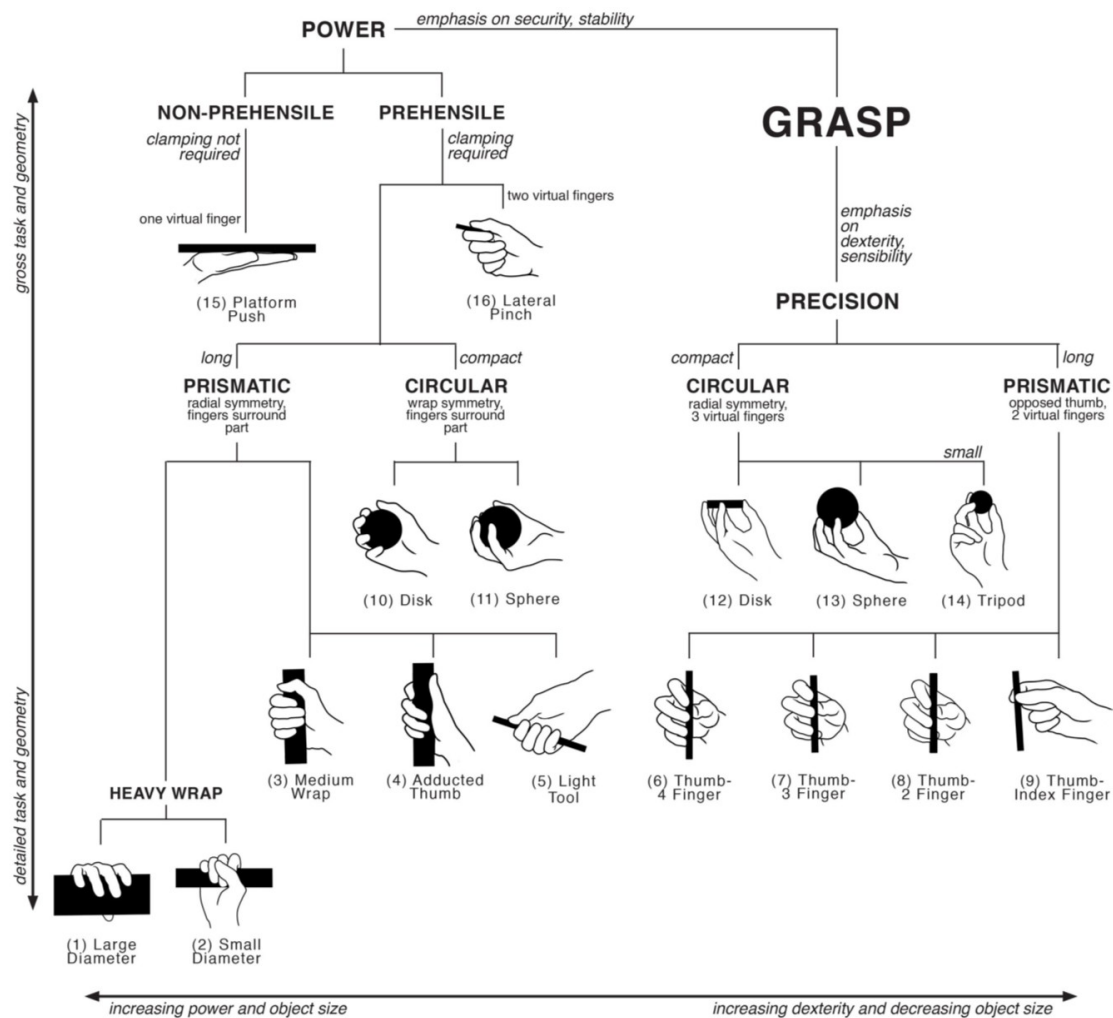


Figura 2.9: Taxonomía de agarre de Cutkosky. [20]

2.2. Electrónica - Hardware

Los componentes a tener en cuenta para el estudio electrónico de la mano son los actuadores, los sensores y los elementos del sistema de control. Además, es importante contemplar la posibilidad de integración de estos componentes en el diseño mecánico de la mano.

2.2.1. Actuadores

Los actuadores ejecutan las instrucciones que reciben del sistema de control, por lo que son el elemento de interacción entre el elemento de control y el mundo real.

En este apartado estudiaremos los distintos tipos de actuadores y se compararán para localizar los tipos de actuadores más deseables para la mano robótica requerida.

A continuación se muestra una primera clasificación de los sistemas de actuación principales usados en algunas de las manos que se estudiarán con posterioridad para este proyecto (ver figura 2.10).

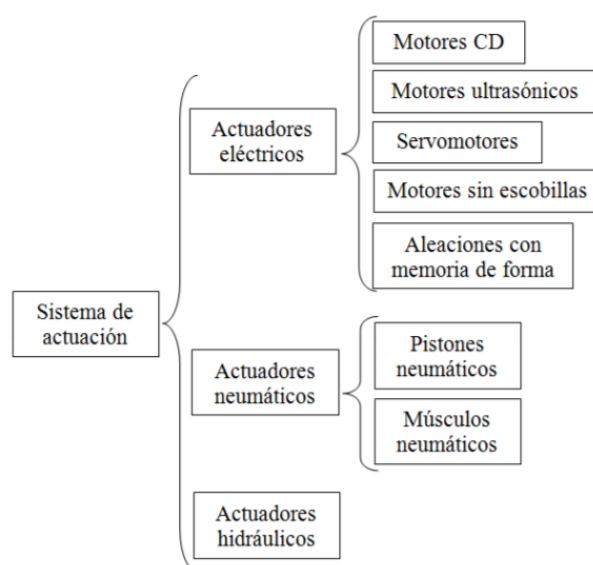


Figura 2.10: Principales sistemas de actuación. [21]

El tipo de actuación más popular entre manos robóticas es la actuación eléctrica, seguida de la neumática y la hidráulica. En este proyecto no se contemplan alternativas con actuación hidráulica, como la mano robótica *Fluidhand* desarrollada en *Forschungszentrum Karlsruhe*, ya que su coste es considerablemente más elevado y se aceptan riesgos asociados con fugas de aceite, que no resultarían trascendentales trasladados a un sistema neumático con fugas de aire [22].

La actuación neumática, a pesar de ser considerada, no es deseable [12], puesto que requiere de una fuente o tanque de aire a presión que añade un volumen importante a la mano y puede no ser conveniente si se tienen restricciones espaciales. El uso de este tipo de mecanismos, además, plantea problemas de control causados por cambios en la presión producidos por variaciones de, por ejemplo, el número de Reynolds.

Actuadores rotatorios

Los actuadores rotatorios son los más utilizados en manos robóticas a lo largo de la historia. Consisten en grupos de motores y servomotores de distintos tipos que coinciden en ofrecer una alta eficiencia, actuación bidireccional, en no requerir de aditamentos adicionales y en una muy alta confiabilidad en su funcionamiento (ver tabla en figura 2.11).

TIPO DE ACUADOR	Motor eléctrico	Motor a pasos	Motor ultrasónico	Servo con motor eléctrico convencional	Servo con motor sin núcleo	Servo con motor sin escobillas
Peso/Costo *	8	7	4	8	8	5
Torque/Costo *	9	8	5	9	10	6
Torque/Peso *	8	6	7	8	9	10
Disponibilidad en el mercado *	10	9	6	10	10	8
Confiabilidad *	8	9	7	10	10	10
Vida útil *	7	8	4	7	8	10
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	6	7	7	7	7	7
Cuidados y mantenimiento *	7	8	8	8	8	10
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	7	7	7	7	7	9
Eficiencia (%)	< 80	< 80	< 50	< 80	< 90	< 95
Peso Mínimo	gr	dgr	gr	dgr	gr	gr
Tamaño mínimo	mm	cm	mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-20 - 85	-20 - 85	-10 - 50	-20 - 85	-20 - 85	-20 - 85
Máxima temperatura alcanzada (°C)	125 (En rotor)	85 (En superficie)	55 (En superficie)	125 (En rotor)	125 (En el rotor)	75 (En superficie)
Precisión	-	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado	Fracción de grado
Tipo de energía utilizada	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA	CD/CA
Tipo de movimiento	Rotatorio	Rotatorio	Lineal/Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio	Rotatorio
Actuación bidireccional	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	No	No	No	No	No
Movimientos amortiguados	No	No	No	No	No	No

Figura 2.11: Características de los actuadores rotatorios (1-10). [21]

Dentro de los estos actuadores, el más usual es el motor de corriente continua (CC), que presentan ventajas como una buena relación rendimiento precio y la posibilidad de inversión del sentido de giro en relación al signo del voltaje aplicado. Otro de los actuadores más habituales son los servomotores, que presentan una gran facilidad en el control pero posee la desventaja de no girar de manera ininterrumpida, permitiendo un giro de hasta 180° en su eje de salida y limitando, por ello, el movimiento.

Actuadores lineales

Los actuadores lineales, comparados en la tabla de la figura 2.12, atienden fundamentalmente a los sistemas de actuación neumáticos e hidráulicos y a otros sistemas menos convencionales como las aleaciones con memoria de forma.

Tipos de actuadores	Aleaciones con memoria de forma	Músculos neumáticos	Pistón eléctrico actuado por SMA	Pistón hidráulico (Solo el actuador)	Pistón neumático (Solo el actuador)
Peso/Costo *	10	7	9	6	7
Fuerza lograda/Peso *	8	9	6	10	8
Fuerza lograda/Costo *	7	9	6	10	8
Disponibilidad en el mercado *	6	4	6	10	10
Confiabilidad *	4	6	5	7	6
Vida útil *	4	7	4	7	7
Flexibilidad y acoplamiento directo a otros sistemas mecánicos *	9	8	9	8	8
Cuidados y mantenimiento *	6	6	6	8	8
Ruido producido en relación al tamaño del actuador *	10	8	9	8	8
Eficiencia (%)	<10	<40	<10	< 85	< 85
Peso Mínimo	dgr/m	dgr	gr.	dgr	dgr
Tamaño mínimo	Ø µm	Ø mm	cm	cm	cm
Temperatura de operación (°C)	-	0 - 50	-75 - 75	**	**
Máxima temperatura alcanzada (°C)	>500	-	-	**	**
Precisión	µm	mm	µm	mm	mm
Tipo de energía utilizada	CD/CA	-	CD/CA	-	-
Tipo de movimiento	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Actuación bidireccional	Si	No	No	Si	Si
Requerimiento de aditamentos adicionales	No	Si	No	Si	Si
Movimientos amortiguados	Si	Si	Si	Si	Si

Figura 2.12: Características de los actuadores lineales (1-10). [21]

Cabe destacar que las aleaciones con memoria de forma son actuadores de peso muy reducido que tienen un nivel muy alto de recuperación plástica. El problema con estos actuadores es que consumen mucha corriente y son muy difíciles de controlar, ya que le afectan de forma crítica numerosos factores como la temperatura, por lo que se consideran actuadores en desarrollo.

La principal ventaja competitiva, en cuanto a especificaciones, de los actuadores lineales respecto a los rotatorios, es que estos permiten movimientos amortiguados. Desafortunadamente, la baja eficiencia y el requerimiento de aditamentos adicionales son factores en contra de este grupo de actuadores.

Transmisión

Hay dos criterios fundamentales para elegir un mecanismo de transmisión correcto. El primero es que los dedos sean lo suficientemente rígidos para realizar distintos tipos de agarre de manera segura y firme. El segundo es que los dedos sean lo suficientemente flexibles para que puedan acomodarse a la forma de los objetos a manipular y esto permita mejores agarres sin la necesidad de aplicar una fuerza excesiva que podría dañar la pieza sujeta.

En la tabla de la figura 2.13 se puede observar una comparación de distintos tipos de dispositivos de transmisión, evaluados del 1-10.

Dispositivo	Tamaño mínimo	Eficiencia máxima	Capacidad de transmisión de potencia*	Resistencia mecánica*	Precisión en los movimientos*	Facilidad de ensamble*	Componentes adicionales	Continuidad en el movimiento*	Mantenimiento*	Relación de transmisión máxima	Disponibilidad en el mercado*
Cadenas	mm	98%	5	5	4	3	No	3	2	10:1	5
Correas	mm	98%	3	3	4	4	No	3	4	15:1	5
Engranes	mm	99%	5	5	5	2	No	5	3	100:1	5
Levas	---	---	5	5	5	4	Sí	5	3	---	4
Tornillo sinfín	---	98%	5	5	5	3	No	5	3	360:1	4
Piñón-cremallera	---	---	5	5	5	4	No	5	4	---	5
Barras	---	---	5	5	5	4	No	3	5	---	---
Ruedas de fricción	---	---	2	2	3	5	No	3	4	---	4
Cables Bowden	μm	---	3	4	4	5	Sí	4	4	---	5
Junta universal	mm	94%	5	5	3	4	Sí	4	4	---	5
Cable-polea simple	mm	---	3	4	4	5	No	4	4	---	5

Figura 2.13: Características de los sistemas de transmisión (1-10). [21]

El uso de cables y poleas es, sin duda, el mecanismo más extendido para conseguir la flexión en los dedos de las manos robóticas. Esto se puede conseguir haciendo pasar un cable por cada falange y utilizando un actuador para mover cada una de ellas, o pasando un único cable a través de todo el dedo y utilizando un único actuador por dedo.

Otros de los mecanismos más utilizados para la transmisión del movimiento en las manos robóticas son aquellos compuestos por barras, mediante los cuales se logra una muy buena precisión; o por cables en arreglo antagónico, presente en algunas manos muy conocidas como la *UB Hand 3* y la *Shadow Hand* y que requiere un elevado número de actuadores.

2.2.2. Sensores

La complejidad sensorial del ser humano, relacionada con el agarre, es de una gran magnitud. Durante el agarre de un objeto, el ser humano evalúa la posición, la presión, el movimiento (velocidad y aceleración) y la fuerza que ejerce la mano, y puede detectar parámetros como la temperatura, la textura y evaluar el daño o el dolor. Todos estos sensores pueden ser considerados “sensores biológicos”[23].

Los sensores artificiales son el elemento de comunicación entre el sistema de control y el entorno real. Son necesarios para que el control de la mano robótica pueda

procesar la información externa y tomar decisiones adecuadas. En este apartado se muestran los principales tipos de sensores utilizados en manos robóticas y se profundiza en aquellos que son de especial utilidad para este proyecto.

Hay muchas formas de clasificar los tipos de sensores existentes. A continuación, se propone una de las clasificaciones más populares en el campo de la robótica móvil, en la cual los sensores se agrupan según la percepción de aspectos internos o externos al robot.

Percepción propioceptiva

Los sensores propioceptivos miden valores internos del sistema. Este tipo de valores pueden reflejar posición, ángulo de articulación, etc. Estos sensores pueden ser encoders, potenciómetros, giroscopios o brújulas, entre otros.

La percepción propioceptiva es fundamental en una mano robótica, pues es prioritario que la mano sea capaz de controlar parámetros como la posición de sus articulaciones y la fuerza que ejercen. Para controlar estos parámetros, se hacen uso de los siguientes sensores.

■ Posición

La posición de los dedos es un parámetro que requiere un control preciso, para ejecutar movimientos adecuados y ejecutar las operaciones deseadas de forma correcta. Los sensores utilizados con más frecuencia para controlar la posición de los dedos son los encoders magnéticos de efecto Hall, que se encuentran en manos como la *Cyberhand* y la *Utah/MIT*. Estos encoders varían su voltaje en relación a un campo magnético (ver figura 2.14) y no solo se usan para la detección de posicionamiento, sino que son también útiles para detectar velocidad, corriente o proximidad.

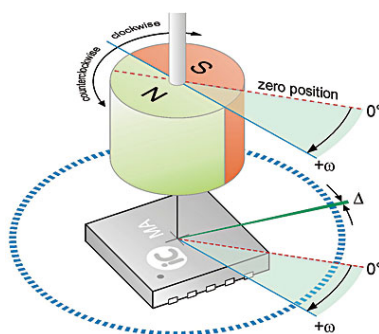


Figura 2.14: Principio de medición del sensor de efecto Hall. [24]

■ Fuerza

Los sensores de fuerza más frecuentemente utilizados en las manos robóticas con los sensores de fuerza resistivos y las galgas extensiométricas [25]. Ambas se fundamentan en el efecto piezorresistivo, que consiste en el cambio en la resistividad eléctrica de un semiconductor o metal cuando se aplica una tensión mecánica.

Los transductores de fuerza basados en galgas extensiométricas suelen contener un elemento similar a un muelle donde se aplican las fuerzas a medir y están más indicados para medidas de precisión, puesto que los sensores de fuerza resistivos están optimizados casi exclusivamente para el uso en el control por toque humano de dispositivos electrónicos [26].

Percepción exteroceptiva

Los sensores exteroceptivos se utilizan para la observación del entorno y de los objetos que lo conforman y la interacción con estos. Sensores Sonar, sensores de temperatura o sensores de presión, son algunos ejemplos de sensores exteroceptivos.

La percepción exteroceptiva puede resultar útil en este proyecto para detectar el contacto con superficies demasiado calientes que podrían dañar al robot o un sobrecalentamiento de la electrónica, mediante sensores de temperatura, o bien para detectar la proximidad de un objeto a agarrar, mediante sensores de proximidad.

■ Temperatura

Los sensores de temperatura se pueden dividir entre sensores de contacto y sensores de no contacto. Para las aplicaciones que se podría dar a este tipo de sensores en este proyecto, un termistor o un termostato serían dispositivos adecuados para la medición de la temperatura en la mano.

A pesar del reducido precio de los termostatos, la principal desventaja de estos sensores es que tienen un largo rango de histéresis desde que los contactos eléctricos se abren hasta que se cierran, por lo que resultan menos precisos que los termistores, los cuales varían su resistividad con la temperatura.

■ Proximidad

Los sensores de proximidad pueden resultar extremadamente útiles en conjunción con los programas de reconocimiento visual de TEO, para realizar agarres precisos y evitar posibles obstáculos [27].

En la tabla 2.4 se muestran los diferentes tipos de sensores de proximidad comparados⁶.

Tabla 2.4: Comparación de sensores de proximidad.

Tipo	Rango de proximidad	Aplicaciones	Materiales detectados
Inductivo	<4-40 mm	Detecciones cercanas de materiales férreos	Aluminio, Acero, Plomo, Cobre, etc
Capacitivo	<3-60 mm	Detecciones cercanas de materiales no férreos	Líquidos, madera, plástico, cristal, etc
Fotoeléctrico	<1-60 mm	Amplio rango de detección	Silicona, plástico, papel, metal, etc
Ultrasónico	<3-30 mm	Amplio rango de detección. Detecta superficies complejas	Superficies arenosas, espuma, celofán, cristal, líquidos, etc

Puesto que los sensores fotoeléctricos son los más versátiles, en comparación con los sensores de proximidad inductivos y capacitivos, y el rango de proximidad es el más amplio de los estudiados, serían los más convenientes para utilizar en la mano robótica.

2.2.3. Placas con microcontroladores

Existen multitud de placas con microcontroladores que pueden utilizarse en proyectos de robótica a este nivel. A continuación, se expone una selección de las cuatro placas más adecuadas al proyecto⁷, tanto por limitaciones espaciales (se tiene en cuenta una futura integración electrónica), como por la versatilidad de las mismas.

Arduino

El Arduino Nano es una placa de pequeño tamaño basada en el microcontrolador ATmega328. Es muy similar a Arduino Mega, con una reducción de memoria y puertos de entrada / salida. Como la mayoría de estas placas, funciona con un cable USB Mini-B en lugar de uno estándar y es compatible con Arduino IDE.

⁶Machine Design, Proximity Sensors Compared, 2016. [En línea] Disponible en: <http://www.machinedesign.com/sensors/proximity-sensors-compared-inductive-capacitive-photoelectric-and-ultrasonic>. [Accedido 02-01-2018]

⁷Ian Buckley, MakeUseOf, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.makeuseof.com/tag/best-arduino-alternative-microcontrollers/>. [Accedido 02-02-2018]

Teensy

Las placas Teensy son consideradas unas de las alternativas más potentes y rápidas. Son compatibles con el IDE y las librerías de Arduino, mediante el uso de la librería Teensyduino. Además permiten la programación con un solo pulsador, funciona con Mac OS X, Linux y Windows y tienen un tamaño muy reducido. El último modelo de Teensy, la versión 3.6, incorpora un procesador de 180 bits a 32 bit, ranura para tarjetas microSD.

NodeMCU

Esta placa con microcontrolador de código abierto, también conocida como *ESP8266*, ejecuta la arquitectura de Arduino y posee una distribución de pines muy similar a estas placas. Posee Wi-Fi y sus componentes se distribuyen en un tamaño muy reducido. Una de las grandes ventajas de la NodeMCU es el precio en comparación a otras alternativas.

PocketBeagle

PocketBeagle está basada en Linux, posee 44 pines GPIO y una ranura microSD. Se trata de una placa muy versátil con grandes similitudes con Arduino y Raspberry Pi. A efectos prácticos, funciona como el primero, pero cuenta con los beneficios de un sistema operativo, lo que la sitúa en la posición de placa más avanzada de esta lista.

2.2.4. Integración de la electrónica

La integración de la electrónica puede clasificarse en remota o integrada. Remota designa a aquella en la que los actuadores se sitúan en una zona distinta a la propia mano o muñeca, como puede ser el brazo u otro elemento del robot. La integración integrada incluye sus componentes electrónicos en el diseño de la propia mano.

Es preferible que la electrónica esté integrada en la estructura de la mano robótica. Partiendo de la base de que TEO posee su propia muñeca y la integración electrónica de la mano en ella no es viable, será preferible que la integración se produzca en el dorsal de la mano, para que no pueda interferir con ningún objeto en los agarres y permita un fácil acceso. La electrónica debe estar convenientemente protegida de posibles elementos externos que puedan entrar en contacto con ella.

2.3. Software

La filosofía de RoboticsLab es que la investigación debe ser abierta y compartida entre todos los usuarios, por lo que todo el código utilizado en TEO es código abierto. Es, por lo tanto, coherente seguir en esta línea de trabajo y perseguir que todos los componentes mecánicos reproducibles por mecanizado CNC o impresión 3D puedan replicarse y los componentes electrónicos de la mano puedan ser controlados con código distribuido y desarrollado libremente.

De igual modo, aunque en este proyecto se contemplan las opciones más competitivas, se valora de forma positiva el uso del software libre, siempre que permita desarrollar las aplicaciones requeridas, por las posibilidades que ofrece esta condición, que se muestran a continuación *noteGNU*, ¿Qué es el software libre?, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html> [Accedido 04-02-2018]:

- Ejecución el programa con cualquier propósito.
- Estudio y modificación el programa a gusto del usuario.
- Redistribución libre de copias para ofrecer soporte.
- Distribución de las copias modificadas a terceros.

A continuación se proponen distintas alternativas de programas comúnmente utilizados tanto para diseñar las piezas y la electrónica como para generar el código necesario para el control de la electrónica.

2.3.1. Diseño y simulación

El diseño y simulación asistidos por ordenador se puede aplicar a la mecánica de la mano y su estructura externa, como a sus circuitos electrónicos. A continuación se presentan dos listas de los programas utilizados de manera más frecuente en estos dos campos.

Diseño mecánico

En robótica es fundamental elegir un software adecuado de modelado 3D. Muchos programas exportan archivos que pueden importarse a otras aplicaciones para ser utilizados en simulaciones y animaciones. Otros programas de diseño 3D incluyen entre sus funciones la posibilidad de realizar simulaciones de distinto grado de complejidad.

■ AutoCAD / Autodesk's Inventor

AutoCAD es una de las herramientas más antiguas y, por lo tanto, más utilizadas en ingeniería para modelado y simulación. Es compatible con Windows y Mac OS. Tiene una interfaz intuitiva y se puede usar junto con otras herramientas para crear modelos numéricos complejos⁸.

Autodesk's Inventor es una herramienta CAD diseñada para ser utilizada principalmente en áreas de ingeniería o en simulación de proyectos de ingeniería mecánica 3D.

■ SolidWorks

Solidworks ha sido creado por Dassault Systemes y es una herramienta de modelado flexible utilizada para crear y simular robots, mecanismos o circuitos eléctricos en formato 3D y 2D. Está disponible para la mayoría de las plataformas y para ciertos dispositivos móviles⁹.

■ FreeCAD

FreeCAD es una aplicación de modelado 3D paramétrico de código abierto y multiplataforma. En el modelado paramétrico, la forma de los objetos diseñados está controlada por parámetros. Estos parámetros son parte del objeto y permanecen modificables en cualquier momento, después de que se haya creado el objeto. Algunos objetos pueden tener otros objetos como parámetros. FreeCAD permite la creación y reproducción de simulaciones sencillas.

■ CATIA

CATIA es un paquete de software comercial multiplataforma CAD / CAM / CAE, también desarrollado por Dassault Systemes¹⁰. Es líder en el sector aeroespacial y es uno de los programas de diseño 3D más potentes del mercado en la actualidad. Está programado en C++ y conforma la base del conjunto de software de gestión del ciclo de vida del producto de la empresa desarrolladora.

⁸EMITT, 2018. [En línea] Disponible en: <http://www.emitt.es/blog/sabes-cuales-son-los-programas-de-dise%C3%B1o-3d-mas-usados-en-ingenieria#sthash.74HvcqgP.RnfKUzwS.dpbs>. [Accedido 12-02-2018]

⁹Smashing Robotics, 3D Modeling Software Compatible with SP, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.smashingrobotics.com/3d-modeling-software-for-robots-compatible-with-simulation-platforms/>. [Accedido 12-02-2018]

¹⁰First-rate Mold Solution, What is CATIA?, 2017. [En línea] Disponible en: <https://www.firstratemold.com/what-is-catia/>. [Accedido 12-02-2018]

Diseño electrónico

Existe una gran oferta de programas destinados al diseño electrónico con funcionalidades muy similares, analizado desde el punto de vista de los requisitos de diseño electrónico de este proyecto. A continuación, se muestran dos listados de programas diferenciados por su tipo de licencia¹¹.

■ Licencia gratuita

Existen tres modalidades en este subapartado de software gratuito, que son: software libre, de código abierto y gratuito. Se especifica, en cada caso, el tipo de modalidad.

- **KiCad** (Windows, Linux. Código abierto): Captura de diagramas electrónicos y diseño de placas de circuito impreso.
- **Simulador de Construcción de Circuitos Digitales con Escenarios Virtuales y Tutoriales Interactivos** (Windows. Código abierto): construcción de circuitos digitales sobre un módulo digital virtual a partir de modelos lógicos de circuitos integrados estándares y de aplicación específica.
- **gEDA** (Linux, Mac. Software libre): Suite de diseño electrónico y herramientas de automatización. Estas herramientas pueden ser usadas para el diseño de circuitos, captura de esquemas, simulación y prototipos, y producción.
- **Pad2pad** (Windows, Mac): Diseño de placas de circuito impreso que acepta los diseños hechos en DesignWorks Express!
- **TinyCad** (Windows. Código abierto): Dibujo de diagramas de circuitos con opción a impresión o publicación.
- **FreePCB** (Windows. Código abierto): Editor de circuitos impresos gratuito de código abierto, realizado bajo GNU, capaz de realizar trabajos de calidad profesional.

■ Licencia de pago

Aunque el software de pago también puede ser software libre, no se trata de una combinación habitual, por lo que ninguno de los ejemplos de programas de pago de diseño electrónico que se muestran a continuación cumplen con esta característica.

¹¹Yo Reparo, Programas de diseño electrónico y simulación, 2017. [En línea] Disponible en: <https://yoreparo.com/electronica/laboratorios-virtuales/preguntas/274599/programas-de-diseno-electronico-y-simulacion>. [Accedido 12-02-2018]

- **MultiSim** (Windows): Diseño electrónico, intercambio de datos con instrumentos virtuales y reales, corrector de errores y sugerencias de cambios sobre el circuito, simulación integrada con microcontroladores.
- **PCB Wizard** (Windows): Diseño de circuitos impresos de una o dos capas. Se complementa con Livewire para su producción.
- **Bartels AutoEngineer** (Windows, Linux): Software de diseño para la captura de diagramas electrónicos y el diseño de circuitos impresos e integrados.
- **OrCAD** (Windows 98/ME/NT/2000/XP/VISTA y Wine): Editor de esquemas compatible con OrCAD, y editor de PCBs. WinQcad es el único programa de diseño de PCBs que genera directamente el código g-code para las máquinas CNC.
- **Proteus** (Windows): Dibujo de esquemas de circuitos, simulación interactiva de circuitos analógicos, digitales, y con microcontroladores, con animación en tiempo real. Diseño de circuitos impresos.

2.3.2. Lenguajes de programación

En esta subsección se exponen los principales lenguajes de programación utilizados en la robótica actual¹².

C / C++

C y C++ son probablemente los lenguajes más utilizados en robótica. Sus ventajas incluyen que muchas librerías de hardware usan estos lenguajes, que permiten la interacción con hardware de bajo nivel y el funcionamiento en tiempo real, y que son lenguajes de programación con una larga trayectoria.

C++ es, a grandes rasgos, una extensión de C con funcionalidades añadidas, por lo que su uso se está extendiendo más en la actualidad. Por lo general, códigos en estos lenguajes son de mayor complejidad que en lenguajes de alto nivel, pues puede precisar bastante más líneas de código implementar la misma funcionalidad. Sin embargo, como la robótica es muy dependiente del hardware, C y C++ se posicionan como lenguajes estándar en este campo.

¹²Alex Owen-Hill, What is the best programming language for robotics?, 2016. [En línea] Disponible en: <https://blog.robotiq.com/what-is-the-best-programming-language-forrobotics>. [Accedido 12-02-2018]

Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel e interpretado. Proporciona una librería estándar muy amplia, además de cientos de miles de librerías para desarrollo de aplicaciones web, gráficos, comunicaciones, y análisis y visualización de datos. Junto a C++, es uno de los lenguajes de programación principales en robótica.

Python ahorra tiempo al programador suprimiendo elementos tales como la definición y el envío de tipos de variables. Además de la gran cantidad de librerías gratuitas creadas para este lenguaje, Python permite enlaces simples con código C / C++, esto significa que las partes pesadas de rendimiento del código se pueden implementar en estos idiomas para evitar la pérdida de rendimiento.

Java

Java es un lenguaje orientado a objetos similar a C++, pero con características avanzadas y simplificadas. Es de acceso libre y puede ejecutarse en todas las plataformas.

La Máquina Virtual Java interpreta instrucciones en tiempo de ejecución. La teoría para usar Java es que puede usar el mismo código en muchas máquinas diferentes, gracias a la Máquina Virtual Java. En la práctica, esto no siempre funciona y algunas veces puede hacer que el código se ejecute lentamente. Sin embargo, Java es bastante popular en algunos sectores de la robótica por su amplia librería estándar.

MATLAB

MATLAB es un lenguaje interpretado, lo que significa que no se compila en código máquina. MATLAB, al igual que otros programas similares como Octave, es popular entre algunos ingenieros especializados en robótica. Se utiliza principalmente para analizar datos, generar gráficos avanzados y desarrollar sistemas de control. Existe una *Toolbox* de Robótica, con funcionalidades y algoritmos propios de la robótica clásica y moderna.

2.3.3. Entornos de desarrollo integrado

La elección del entorno de desarrollo integrado (IDE) se ha de realizar teniendo en cuenta las especificaciones del mismo en función de eficiencia de código y velocidad de desarrollo, así como el lenguaje de programación que acepta. Otras características importantes son la cantidad y calidad de librerías que posee y la comunicación en serie

con el gestor de arranque, entre otros.

Como se explica en apartados anteriores, los lenguajes más utilizados en robótica son C/C++, Python, Java y MATLAB (el cual solo puede desarrollarse en el entorno de MATLAB); y entre las placas más utilizadas en manos robóticas contamos con Arduino, Teensy, MCU y BeagleBoard, por lo que a continuación se estudiarán dos de los entornos compatibles con algunas o todas las opciones anteriores.

Arduino

El entorno de desarrollo integrado Arduino¹³ es, probablemente, el más popular entre los mencionados en esta lista. Funciona en Windows, Mac y Linux y contiene un editor de texto para escribir código, un área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones para funciones comunes y una serie de menús. Se conecta al hardware Arduino y Genuino para cargar programas y comunicarse con ellos, aunque también puede comunicarse con hardware de terceros agregando los paquetes de soporte al directorio de hardware del directorio del cuaderno de bocetos.

Entre sus funcionalidades, permite administrar bocetos con más de un archivo, los cuales pueden ser archivos de código Arduino, archivos C, archivos C++ o archivos de encabezado (.h). Monitorea en serie todo lo enviado desde la placa Arduino o Genuino a través de un cable USB o serie. Además, posee una gran cantidad de librerías, algunas de ellas están incluidas en el propio software, y otras se pueden descargar desde una variedad de fuentes o a través del Administrador de la Biblioteca.

Una de las grandes ventajas de este IDE es su simplicidad y ese es, probablemente, el motivo por el que es una buena herramienta para iniciarse en los entornos de desarrollo integrado. Las razones para prescindir de Arduino son, básicamente, dos: la necesidad de un IDE más robusto en términos de eficiencia y velocidad de desarrollo o bien la necesidad de utilizar lenguajes distintos a los procesados por Arduino.

PlatformIO (con editor Atom)

Este IDE se basa en Python y se ejecuta en diferentes sistemas operativos, como Windows, Mac y Linux. A pesar de que PlatformIO es una aplicación de consola, cabe destacar que se puede usar en combinación con el IDE y el editor de texto de PlatformIO IDE para Atom, CLion, Eclipse, Emacs, NetBeans, Qt Creator, Sublime Text, VIM, Visual Studio o PlatformIO IDE para VSCode, aunque este estudio se base en la opción

¹³Arduino, Arduino Software, 2007. [En línea] Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Environment>. [Accedido 12-02-2018]

de editor de Atom.

Permite la instalación de distintos paquetes de entorno de desarrollo para lenguajes como TypeScript & JavaScript, Flow, C#, Java y PHP, y permite la descarga de otros paquetes de lenguaje desarrollados por la comunidad como CSS, Markdown, YAML, Java, Git, Make, Objetivo-C, JSON, CoffeeScript, Python, Ruby, HTML, Ruby on Rails, C / C++, Go, Shell Script, Clojure, LESS, Sass, Perl, TOML, XML, Mustache, SQL y Property List (Apple).

Entre sus principales ventajas se encuentra un rápido desarrollo del flujo de trabajo multiproyecto mediante múltiples paneles, el desarrollo integrado con un sistema de compilación multiplataforma sin dependencias externas al software del sistema operativo y un depurador unificado con soporte para las múltiples arquitecturas y plataformas de desarrollo que le permite depurar más de 100 tarjetas integradas¹⁴.

Esta alternativa IDE admite varias placas, como placas de desarrollo Arduino en general, placas de la familia Raspberry Pi, Teensy, BeagleBoard, entre muchas otras. Se propone como una solución completa para desarrollar proyectos de una manera fácil e intuitiva. La interfaz de PlatformIO es algo más compleja, en comparación con Arduino IDE, pero se puede considerar superior en robustez.

Otros IDEs

Muchos otros IDEs proporcionan funcionalidades similares, por lo que la elección del IDE adecuado dependerá de las necesidades y los gustos del programador. A continuación se expone una lista con los entornos de desarrollo integrado más populares en la actualidad¹⁵, no mencionados con anterioridad, que podrían ser, de igual modo, útiles para este proyecto; junto con los principales lenguajes de programación aceptados por cada uno:

- **Eclipse:** C, C++, Java, Perl, PHP, Python, Ruby.
- **Visual Studio:** ASP.NET, DHTML, JavaScript, JScript, Visual Basic, Visual C#, Visual C++, Visual F#, XAML.
- **Gedit:** C, C++, Java, HTML, XML, Python, Perl.
- **Komodo:** CSS, Go, JavaScript, HTML, NodeJS, PerlPHP, Python, Ruby, Tcl.

¹⁴PlatformIO, PlatformIO IDE for Atom, 2017. [En línea] Disponible en: <http://docs.platformio.org/en/latest/ide/atom.html>. [Accedido 12-02-2018]

¹⁵KeyCDN, Best IDE Software – a List of the Top 10, 2017. [En línea] <https://www.keycdn.com/blog/best-ide/>. [Accedido 14-02-2018]

2.4. Comparación de manos robóticas

En los últimos cincuenta años se han desarrollado cientos de robots tanto en instituciones de investigación públicas como privadas. De igual modo, son numerosas las manos robóticas que se han producido hasta el momento, por lo que, en la tabla 2.5 se muestran tan solo aquellas que cumplen con la propiedad de destreza, presentadas por orden alfabético.

Se detallan las características más representativas de este tipo de manos, que son el número de dedos, los grados de actuación (GDA) o número de actuadores que controlan los grados de libertad, la configuración de sus actuadores y los mecanismos de transmisión.

Tabla 2.5: Manos robóticas diestras más relevantes de los últimos 50 años. [12][28]

Nombre	Dedos	GDA	Conf. de actuadores	Mecanismo de transmisión
ARMAR's [29]	5	8	Integrados	Actuación hidráulica
ARTS [30]	5	11	Híbridos	Tendón + Engranaje + Tornillo sin fin
Cyberhand [31]	5	6	Remotos	Tendón
Dextra ¹⁶	5	15	Integrados	Tendón
Dexhand [32]	4	6	Híbridos	Tendón
DIST [33]	4	16	Remotos	Tendón
DLR-I [34]	4	12	Integrados	Tendón
DLR-II [35]	4	13	Integrados	Correa + Articulación + Engranaje
DLR HASy [36]	5	19	Remotos	Tendón
ELU II	5	9	Integrados	Nudillos + Ventosas
Extrinsic [37]	5	11	Remotos	Tendón
Gifu II [38]	5	16	Integrados	Articulación + Engranaje
Gifu III [39]	5	16	Integrados	Articulación + Engranaje
High-speed [40]	3	8	Integrados	Reductor armónico
iCub [41]	5	9	Híbridos	Tendón
Intrinsic [42]	5	15	Integrados	Correa + Ballscrew
KIST [43]	4	9	Integrados	Unión espacial
LMS [44]	4	16	Remotos	Tendón
MEKA H2 [45]	4	5	Integrados	Tendón + Muelle
NAIST [46]	4	12	Integrados	Articulación + Engranaje

¹⁶Alvaro Villoslada. Dextra, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra>. [Accedido 12-02-2018]

Tabla 2.5 continuada de la página anterior.

Nombre	Dedos	GDA	Conf. de actuadores	Mecanismo de transmisión
NAIST 2 [47]	5	16	Remotos	Tendón + Engranaje
Okada [48]	3	11	Remotos	Tendón + Polea
Pinching [49]	5	18	Integrados	Engranaje + Polea
Robonaut II [50] [51]	5	14	Remotos	Tendón
Shadow [52]	5	18	Remotos	Tendón
Stanford [53]	3	9	Remotos	Tendón
Twendy-One [54]	4	13	Integrados	Articulación + Engranaje
UB-II [55]	3	11	Remotos	Tendón
UB-III [56]	5	16	Remotos	Tendón
UB-IV [57]	5	Variable	Remotos	Tendón “corredizo”
Ultrasonic [58]	5	20	Integrados	Motores ultrasónicos + Elementos elásticos
UNUPI [59]	5	1	Híbridos	Articulaciones Hillberry
Utah/M.I.T. [60]	4	16	Remotos	Tendón
ZJUT [61]	5	20	Remotos	Actuadore neumático flexible

Lo más destacable de la tabla 2.5 es observar la tendencia de las especificaciones estudiadas. Se puede observar que una mano robótica diestra media tiene 4 ó 5 dedos, más de 10 GDL y utiliza el tendón como mecanismo de transmisión del movimiento del actuador.

En los apartados de esta sección se exponen los detalles de la mano a reemplazar de TEO, la Lacquey Fetch Hand, para a continuación proceder a un estudio de las manos robóticas existentes relevantes para el proyecto y así concluir con la selección de la mano que se considere más adecuada.

2.4.1. Lacquey Fetch Hand

La mano robótica Fetch Hand (ver figura 2.15) es la mano a reemplazar de TEO. Fue desarrollada por la empresa privada Lacquey Robot Grasping Solutions. Esta empresa se centra en la tecnología de agarre de objetos de distintas formas y tamaños, como frutas y verduras¹⁷.

¹⁷Hizook, New underactuated robot hands from lacquey and willow garage, 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.hizook.com/blog/2012/12/05/new-underactuated-robot-handslacquey-and-willow-garage#FetchHand>. [Accedido 12-02-2018]

Puede aguantar una masa máxima de 1 kg, lo que resulta insuficiente para objetos como la plancha, y diámetros de hasta 125 mm. La pinza tiene un control de fuerza incorporado que acepta cualquier entrada entre 12 y 30 V, a la vez que protege el motor de una sobrecarga eléctrica. Dado que TEO suministra una tensión de 36 V, hace falta un convertidor DC/DC para no dañar la electrónica de la mano.

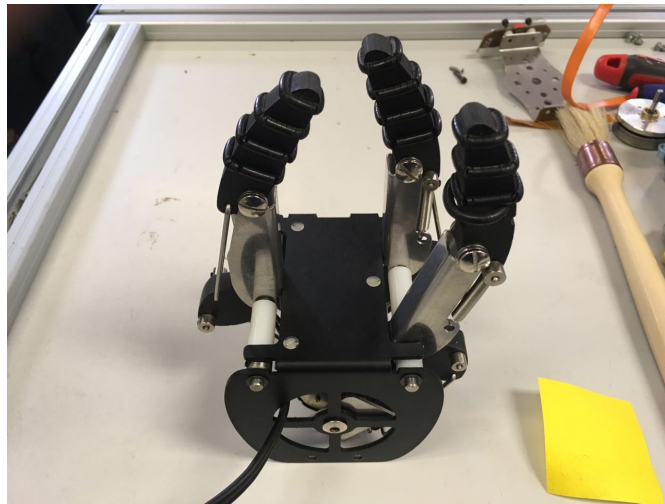


Figura 2.15: Mano actual de TEO.

La mano contiene un solo motor para sus tres dedos. Cada dedo posee dos grados de libertad, sumando un total de seis, por lo que nos encontramos ante un mecanismo muy subactuado (1:6). Al cambiar el signo de la señal, la mano se abre y se cierra, siendo este el único movimiento que puede realizar, sin posiciones intermedias entre el estado de abierto y cerrado. En cuanto a la integración de la electrónica, ha tenido varias versiones de su circuito impreso integrado en el lateral de su estructura.

La Fetch Hand es modular, el dedo enfrentado es igual que los dos restantes, por lo que se aleja de las condiciones de antropomorfismo. Además, sus dedos nunca llegan a enfrentarse, lo que le impide realizar varios tipos de agarres, algunos fundamentales para el trabajo con textiles como es el caso del agarre de punta. En lo referente al agarre, los dedos tienen solo dos falanges, lo que se traduce en una sujeción con pocos puntos de contacto.

La mano tiene un mecanismo basado en *passive compliance*, formado por varios muelles que acompañan su movimiento. Esta característica (ya sea que se introduzca a propósito o no) generalmente degrada el rendimiento del robot en el sentido tradicional (es decir, velocidad y precisión) [62]. Al poder controlar el torque del motor, la fuerza de agarre puede predecirse para productos dentro de un cierto rango de tamaño.

2.4.2. Manos seleccionadas para análisis

Para la primera selección (tabla 2.6), se han tenido en cuenta los requisitos apuntados en los apartados anteriores de este capítulo; por lo que todas las manos son, en distintos grados, antropomórficas, cuentan con un mínimo de cuatro dedos con pulgar enfrentado, y no menos de los 6 GDL que posee la mano robótica Fetch Hand. En esta nueva tabla se presenta el año de aparición de la mano robótica, para poder evaluar la antigüedad de su tecnología; el número de actuadores, para poder valorar el peso de la mano de un modo intuitivo; y el tipo de actuadores que la mano utiliza, habiendo establecido de forma previa una preferencia por el tipo de actuador eléctrico.

Tabla 2.6: Pre-selección de manos robóticas en orden cronológico. [12] [28] [63]

Nombre	Año	Número de actuadores GDA	GDL	Número de dedos	Tipo de actuadores
Utah/M.I.T.	1983	16	16	4	Eléct./Neum.
LMS	1998	16	16	4	Eléctricos
DLR II	2001	13	18	4	Eléctricos
Gifu III	2002	16	20	5	Eléctricos
Shadow	2003	18	22	5	Neumáticos
ARMAR's	2006	8	11	5	Eléctricos
Cyberhand		6	16	5	Eléctricos
Twendy-One	2009	13	16	4	Eléctricos
MEKA H2		5	12	4	Eléctricos
ELU2		9	17	5	Eléctricos
UB4		2N conf	20	5	Eléctricos
	N conf				
	N+1 conf				
	Unilateral tendon act.				
Robonaut 2	2010	12	20	5	Eléctricos
UNIPi	2012	1	17	5	Eléctricos
Dextra ¹⁸	2016	6	15	5	Eléctricos

Las manos que pueden ser útiles para las funciones previstas se describen a continuación para su estudio individual [12]. Se valora el antropomorfismo en relación a la destreza (*dexterity*). Se considera que posee la propiedad de antropomorfismo toda aquella mano que, aún no intentando reproducir con exactitud la mano humana, logra tener una apariencia y cinemática similar y una destreza de alto nivel, que le permita desarrollar acciones de manipulación y agarre cotidianas con facilidad. Se valora igualmente que la mano sea fácil de controlar y cómoda de utilizar.

Mano Utah / M.I.T. (1983)

La mano Utah (ver figura 2.16) es una de las manos más antiguas considerada en este trabajo. Posee 16 GDL. Consta de tres dedos idénticos con 4 GDL que permiten la abducción / aducción, y el pulgar, que tiene 4 GDL, de los cuales uno se utiliza para oponer este dedo. Este tipo de configuración del pulgar se encuentra, de manera similar, en manos como la LMS, Twendy y Elu2. Su configuración remota incluye 32 actuadores eléctricos, cuyo movimiento se transmite a través de tendones, cuya tensión se mantiene gracias a sensores de tensión. Una versión posterior de esta mano posee actuadores neumáticos, por ese motivo en la tabla se contemplan ambas posibilidades.

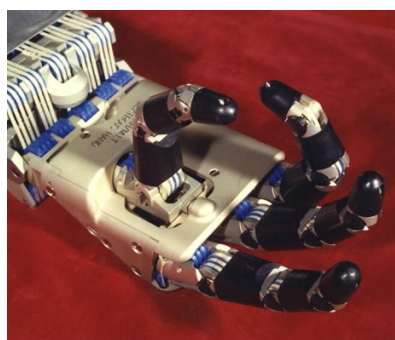


Figura 2.16: Mano robótica UTAH / M.I.T.¹⁹. ©Computer History Museum

Una característica curiosa de la cinemática de Utah (ver figura 2.17), que comparten la mano Elu2, es la falange adicional del pulgar. Mediante el mecanismo de añadir un eje de extensión / flexión muy cerca del eje de rotación, se consigue una movilidad del pulgar similar a la del pulgar humano, simulando un movimiento esférico.

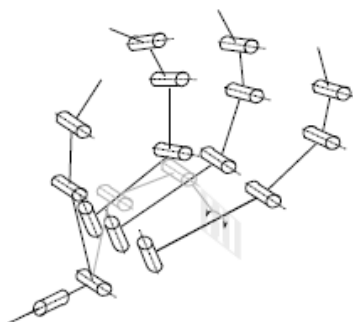


Figura 2.17: Esquemático de la cinemática de la mano Utah/M.I.T. [12]

¹⁹Computer History Museum, Artifact Details, 2013. [En línea] Disponible en: <http://www.computerhistory.org/collections/catalog/102693567>. [Accedido 12-12-2017]

Mano Twendy-One (2009)

Twendy-One (ver figura 2.18) debe su nombre al robot para la cual fueron fabricadas, desarrollado por los Laboratorios Sugano de la Universidad de Waseda. Al igual que la mano Utah, está formada por cuatro dedos, siendo esta la última mano de cuatro dedos considerada. Sus cuatro dedos suman 16 articulaciones y cada uno posee 4 grados de libertad. Contiene sensores táctiles en la palma y las yemas de los dedos, así como un sensor de fuerza / par de torsión de 6 DoF en cada dedo. Las superficies de contacto de los dedos y la mano están cubiertas con almohadillas de silicona para mejorar el agarre.

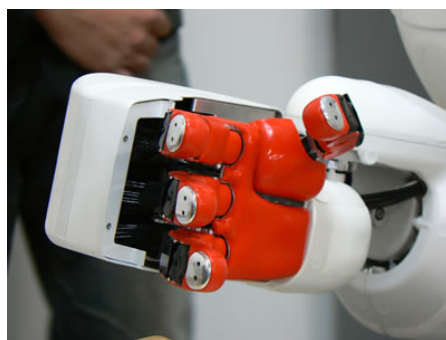


Figura 2.18: Mano robótica Twendy-One²⁰. ©Sugano Laboratory

El diseño cinemático de Twendy (ver figura 2.19) es más complejo que el de la mano Utah. Fusiona la abducción, la aducción, la flexión y la extensión en una misma articulación, en la falange proximal. Incluye una característica adicional, que es dotar al pulgar de doble rotación, la que le permite oponerse y una adicional, que le permitiría hacer agarres más complejos, como puede ser el agarre prensil circular de disco incluido en la taxonomía de Cutkosky.

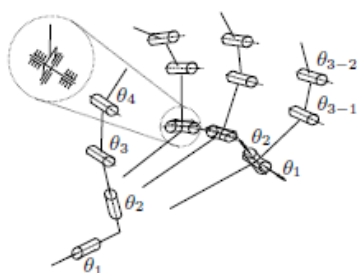


Figura 2.19: Esquemático de la cinemática de la mano Twendy-One. [12]

²⁰Technovelgy, Twendy-One Robot Is Your Humanoid Helper, 2007. [En línea] Disponible en: <http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=1326>. [Accedido 12-12-2017]

Mano Elu 2 (2009)

La mano Elu2 (ver figura 2.20) es una mano modular comercial cumple con las características de estructura y velocidad de la mano humana. Posee 9 actuadores y 17 grados de libertad. Incorpora la característica de poder ahuecar la mano gracias al grado de libertad que posee en la palma. Está construida con aluminio mediante sinterizado selectivo con láser, lo que le proporciona especial robustez.



Figura 2.20: Mano robótica Elu 2²¹. ©Elumotion Ltd

La cinemática de la mano (ver figura 2.21) prescinde de los movimiento de abducción / aducción y, en su defecto, introduce un movimiento de plegado de la palma a la altura del dedo anular. El mecanismo del pulgar sigue el mismo razonamiento del de la mano Utah / M.I.T., incluyendo tres falanges y permitiendo la rotación gracias a un actuador localizado en la base de la falange más cercana a la palma.

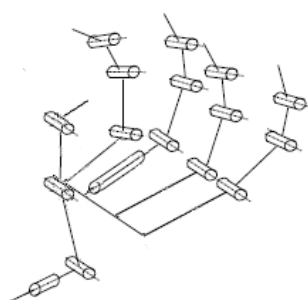


Figura 2.21: Esquemático de la cinemática de la mano Elu 2.

²¹Elumotion, EH2 - Elumotion Hand 2, 2016. [En línea] Disponible en: <http://elumotion.com/index.php/portfolio/project-title-1>, 2016.

Mano Robonaut 2 (2010)

La mano Robonaut 2 (ver figura 2.22) es la evolución cinemática de la mano Robonaut, desarrolladas ambas por la NASA. Es la mano más antropomórfica de las consideradas, puesto que está diseñada para realizar funciones similares a las realizadas por los astronautas en el espacio. Tanto las características de fuerza y destreza buscan asemejarse lo máximo posible a las humanas. Posee 5 dedos y 20 GDL, 4 en el pulgar, 4 en cada uno de los dedos restantes. Sus dedos se diferencian entre dedos de agarre (anular y meñique) y dedos diestros (índice y corazón). Su configuración de actuadores es remota, se han de integrar en el antebrazo del robot; y su transmisión es rotativa, transformada en lineal, mediante cables cortos bidireccionales.

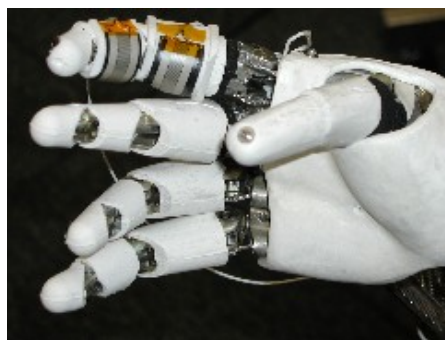


Figura 2.22: Mano robótica Robonaut 2²². ©NASA

De la cinemática de esta mano (ver figura 2.23) cabe destacar, por una parte, la posibilidad de realizar el plegado de los dedos de agarre y, por otra parte, la articulación trapeciometacarpiana, que consigue simular el movimiento humano mediante dos ejes de movimiento perpendiculares, que permiten un rango de movimiento de $70^\circ / 110^\circ$.

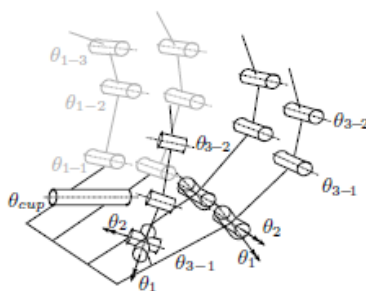


Figura 2.23: Esquemático de la cinemática de la mano Robonaut 2. [12]

²²NASA, International Space Station Imagery, 2006. [En línea] Disponible en: <https://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/eva/html/jsc2004e03468.html>. [Accedido 12-12-2017]

Mano Dextra (2016)

Dextra (ver figura 2.24) es la mano más reciente de las estudiadas. Se trata de una mano robótica replicable, de código abierto, de bajo coste, impresa en 3D y de fácil control. Posee 6 actuadores, 5 destinados al movimiento de los dedos y 1 destinado al posicionamiento del pulgar. La transmisión de esta mano es, al igual que la mano Elu 2, rotatoria convertida a lineal, mediante cables, en este caso, unidireccionales. Posee 15 GDL, 3 en cada dedo de la mano, una de ellas destinada a la abducción del pulgar y las restantes encargadas de flexionar y extender, para permitir el agarre. Los dedos son modulares, mas están posicionados de manera escalonada para imitar las diferencias de altura entre los dedos humanos.



Figura 2.24: Mano robótica Dextra²³. ©Álvaro Villoslada

La cinemática de Dextra (ver figura 2.25) es una versión simplificada de la cinemática de Elu 2, prescindiendo del ahuecamiento de la mano y de uno de los grados de libertad del dedo pulgar. El pulgar consigue su abducción mediante un mecanismo conectado al eje giratorio de un servomotor, por lo que el eje de giro no corta perpendicularmente a los ejes de flexión / extensión del dedo, como en el resto de los casos.

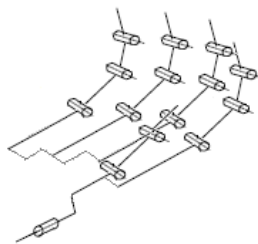


Figura 2.25: Esquemático de la cinemática de la mano Dextra.

²³Á. Villoslada, Dextra Gallery, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890/gallery/#d8713c16061f6c844b2d1aba2b118703>. [Accedido 12-12-2017]

2.4.3. Justificación de la solución

A continuación se presenta la conclusión extraída del estudio elaborado mediante el capítulo de Estado del Arte. La solución deseada es la mano que mejor pueda adaptarse a las características del proyecto, por lo que, no necesariamente la mano más avanzada tecnológicamente reúne los requisitos para ser la mano seleccionada.

Siguiendo esta línea de razonamiento, y partiendo de la base de que las últimas manos estudiadas presentan características de antropomorfismo y destreza suficientes para su labor en TEO, la selección final tiene en cuenta especificaciones como la facilidad de reproducción. La facilidad de reproducción incluye tanto la facilidad de encontrar sus componentes y materiales de forma sencilla, la facilidad de montaje y que estos componentes, tanto como las herramientas para su fabricación, sean asequibles dentro del contexto de este proyecto.

Teniendo en consideración lo mencionado con anterioridad, se decide contar con la mano *Dextra*, por los motivos que se listan a continuación²⁴.

1. Replicable mediante impresión 3D y modificable
2. Completamente de código abierto
3. Diseño compacto
4. Actuación integrada
5. Dedos modulares
6. Dedos subactuados
7. Agarres adaptables
8. Interfaces humano-robot: control EMG e interfaz de PC
9. Bajo coste y materiales fácilmente obtenibles

A pesar de haber elegido una mano robótica en concreto, el estudio del estado del arte de las manos robóticas desarrolladas a lo largo de la historia se asienta como base para introducir modificaciones y mejoras que se consideren pertinentes para la adaptación total de la mano al robot humanoide TEO.

En el capítulo 4, llamado *Dextra original*, se realiza un estudio completo de la mano seleccionada, de forma previa a su fabricación, por lo que se amplía la información mostrada en la sección actual y se permite una mejor comprensión de la decisión final.

²⁴Á. Villoslada, *Dextra description*, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra>. [Accedido: 09-10-2017]

Capítulo 3

Gestión del proyecto

3.1. Marcos reguladores

La solución propuesta se escoge teniendo en cuenta el conjunto de leyes y reglamentos pertinentes que se definen para los sectores de la investigación y la robótica, para así determinar las posibilidades de acción del presente proyecto.

3.1.1. Marco regulador legal

Se incluye esta sección con el propósito de realizar un breve análisis de la legislación vigente que afecta de forma directa a este proyecto, es decir, de la normativa que afecta directamente a la propiedad intelectual y al marco actual de responsabilidad civil en la robótica.

Propiedad Intelectual

Este apartado define el marco legal de la propiedad intelectual siguiendo la definición de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), que incluye en este concepto tanto los derechos de propiedad intelectual que corresponden a los autores de las obras, como los derechos de propiedad industrial²⁵.

A continuación se expone el código de propiedad intelectual, la ley fundamental relacionada con los derechos asociados, tanto morales como económicos, y la ley de patentes, recogidas en el Boletín Oficial del Estado (BOE) [64].

²⁵Biblioteca UC3M, Propiedad intelectual y derechos de autor, 2015. [En línea] Disponible en: https://www.uc3m.es/ss/Satellite/Biblioteca/es/TextoDosColumnas/1371213999139/Propiedad_intelectual_y_derechos_de_autor:_cuestiones_generales. [Accedido 02-06-2018]

- Código de Propiedad Intelectual publicado por el BOE. Edición actualizada a 18 de abril de 2018. [65]
- Texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia. Aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril. [66]
- Ley 24/2015, de 24 de julio, de Patentes. [67]

Otras leyes de trascendencia a nivel europeo, a tener en cuenta en materia de propiedad intelectual, son las siguientes:

- Directiva 2001/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 22 de mayo de 2001, relativa a la armonización de determinados aspectos de los derechos de autor y derechos afines a los derechos de autor en la sociedad de la información. [68]
- Convenio de Berna para la Protección de las Obras Literarias y Artísticas (enmendado el 28 de septiembre de 1979). [69]
- Tratado de la OMPI sobre Derecho de Autor (WCT) (1996). [70]
- Tratado de la OMPI sobre el Derecho de Patentes (2000). [71]

Los derechos de explotación, además de estar regulados por el *copyright*, pueden estar regulados por el *copyleft*, como es el caso de este proyecto. El *copyleft* se trata de un movimiento alternativo que defiende el uso de licencias libres. Estas licencias permiten ofrecer distintos grados de libertad sobre las obras, con la condición de que las obras derivadas de otras obras licenciadas, hereden el tipo de licencia elegida por el autor original²⁶. La licencia GPLv3, utilizada en este proyecto, deriva de la licencia Pública General de GNU, que fue la primera y más destacada de *copyleft*, orientada al software.

Las licencias Creative Commons, también utilizadas en este proyecto, siguen el concepto de *copyleft*. En este caso, proponen algunos derechos reservados. En España,

²⁶Copyleft, Copyleft and the GNU General Public License, 2015. [En línea] Disponible en: <https://copyleft.org/guide/>. [Accedido 12-06-2018]

contamos desde 2004 con seis licencias de este tipo²⁷. Para elegir la licencia Creative Commons adecuada, se puede consultar el diagrama mostrado en la figura 3.1. En el caso de este proyecto, en particular, el uso de la licencia aplicada al trabajo generado atiende a la necesidad de perpetuar el uso de la licencia elegida por el autor de la obra de la que parte este proyecto.

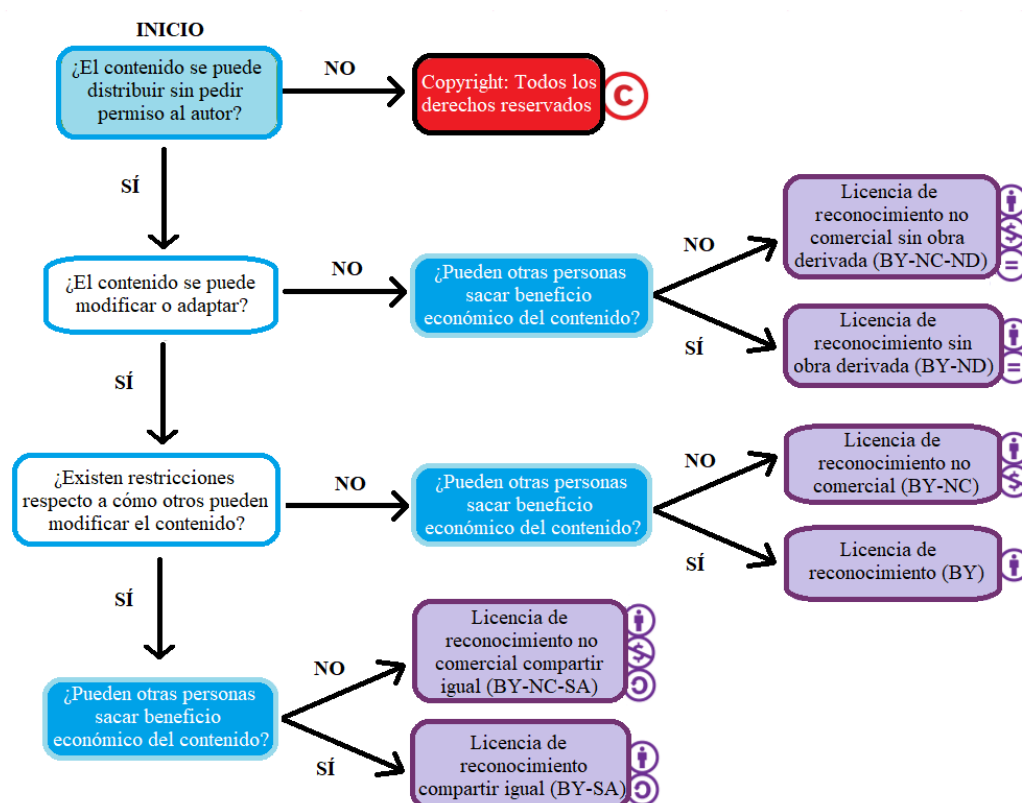


Figura 3.1: Diagrama elección de licencia Creative Commons adecuada²⁸.

Derecho civil en la robótica

En este trabajo de fin de grado se va a trabajar con un robot humanoide, por lo que es fundamental conocer la normativa aplicada al campo de la robótica. La legislación sobre robótica en España está aún en proceso de gestación, por lo que el documento de referencia para este proyecto es el mostrado a continuación:

²⁷Creative Commons, Sobre las licencias, 2015. [En línea] Disponible en: https://creativecommons.org/licenses/?lang=es_ES. [Accedido 02-06-2018]

²⁸Traducido de: Which Creative Commons licence is right for me?, 2015. [En línea] Disponible en: <http://creativecommons.org.au/content/licensing-flowchart.pdf>. [Accedido 12-06-2018]

- European Civil Law Rules in Robotics (12-10-2016), por Nathalie Nevejans y comisionado por el Comité de Asuntos Legales del Parlamento Europeo. [72]

Acerca del estado actual de la regulación de la robótica en España, el artículo *Regulación Legal de la Robótica y la Inteligencia Artificial: Retos de Futuro*, publicado en la Revista Jurídica de la Universidad de León, ofrece una visión completa de este punto [73].

Financiación

El proyecto actual está financiado por la Universidad Carlos III de Madrid, que a su vez recibe financiación para la investigación por parte del Estado. Las bases de esta regulación, a tener en cuenta, se presentan en el siguiente documento:

- Orden ECC/1333/2015, de 2 de julio, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de ayudas públicas del Programa Estatal de Liderazgo Empresarial en I+D+I, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020 («Boletín Oficial del Estado» núm. 159, de 4 de julio de 2015). [74]

3.1.2. Marco técnico del proyecto

En este apartado se incluyen los estándares técnicos aplicables sobre la tecnología desarrollada, y sobre lenguajes de programación y herramientas utilizadas.

Robótica

Para la realización de este trabajo es necesario contar con los siguientes estándares técnicos del catálogo ISO/TC 299, enfocado a la robótica (excluyendo juguetes y aplicaciones militares):

- ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices. Vocabulary. (03-2012) [75]
- ISO 9787:2013 - Robots and robotic devices. Coordinate systems and motion nomenclatures. (05-2013-05) [76]

Debido a que la Asociación Española de Normalización, UNE, es responsable del desarrollo y difusión de las normas técnicas en España para que los productos y servicios sean seguros y respondan a lo que el consumidor espera de él, se presenta a

continuación las norma UNE-ISO pertinente, adoptada a nivel nacional:

- UNE-EN ISO 13482:2014 - Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots no industriales. Robots de asistencia personal no médicos.(ISO 13482:2014). [77]

Estándares técnicos

La norma UNE-EN ISO 80000-1:2014 admite el punto y la coma como separadores decimales, por lo que en este trabajo se decide utilizar el punto como separador decimal, atendiendo a preferencias de estilo. Las normas en las que se basan la redacción técnica de este proyecto son las siguientes:

- UNE-EN ISO 80000-1:2014 - Magnitudes y unidades. Parte 1: Generalidades. (ISO 80000-1:2009 + Cor 1:2011). [78]
- UNE-EN ISO 80000-2:2013 - Magnitudes y unidades. Parte 2: Signos matemáticos y símbolos matemáticos que se utilizan en las ciencias naturales y en la tecnología. (ISO 80000-2:2009). [79]
- UNE-EN ISO 80000-3:2013 - Magnitudes y unidades. Parte 3: Espacio y tiempo. (ISO 80000-3:2006). [80]
- UNE-EN ISO 80000-4:2014 - Magnitudes y unidades. Parte 4: Mecánica. (ISO 80000-4:2006). [81]

Programación

Los programas elaborados en este proyecto se basan en el lenguaje de programación Python, por lo que la normas seguidas se basan en PEP (*Python Enhancement Proposals*), una serie de documentos de especificaciones técnicas acerca de este lenguaje²⁹. Los documentos más relevantes para este proyecto son:

- PEP 8 – Style Guide for Python Code (05-07-2001).

²⁹Python, PEP 0, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.python.org/dev/peps/>. [Accedido: 02-06-2018]

- PEP 257 – Docstring Conventions (29-05-2001).
- PEP 20 – The Zen of Python (19-08-2004).

3.1.3. Marco organizativo

Para la abordar este proyecto, se define como base el reglamento de organización de la asignatura Trabajo Fin de Grado (TFG) para los Grados de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de la Universidad Carlos III de Madrid, aprobado por la Junta de Escuela en sesión de 6 de noviembre de 2014 y modificado en sesión de 29 de noviembre de 2016 [82].

Convocatoria y plazos

La asignatura de Trabajo de Fin de grado se organiza en una convocatoria anual, con un periodo de matrícula único y tres periodos de defensa. A continuación se muestran las fechas de presentación de este proyecto (ver tabla 3.1), necesarias para tener en cuenta la planificación del mismo.

Tabla 3.1: Fechas para la evaluación de este proyecto. Convocatoria 2018.

Fase	Fechas
Oferta, solicitud y adjudicación	De abril al 30 noviembre de 2017
Matrícula	En los periodos de matrícula del 1º o 2º cuatrimestre
Solicitud Defensa	8 al 15 de mayo
Publicación Listado	11 de junio
Entrega de Memoria	12 al 19 de junio
Entrega autorización publicación Memoria	12 al 21 de junio
Sesión	2 al 13 de julio

Modalidad

Este Trabajo de Fin de Grado se realiza en modalidad específica. En la oferta del TFG específico, el profesor adscrito a los Departamentos con docencia, en este caso el Dr. D. Juan Carlos González Vítores, perteneciente al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, publica, en las fechas destinadas a este propósito (tabla 3.1), la

información que se muestra a continuación.

- Título del TFG: Desarrollo e integración de mano robótica antropomórfica en el robot humanoide TEO
- Modalidad: Específico
- Tipo de TFG: Interno
- Idioma: Castellano
- Titulación en la que se oferta el TFG: Ingeniería en Tecnologías Industriales
- Nombre del tutor: Juan Carlos González Vítores

Tiempo de dedicación

En el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, la asignatura del Trabajo de Fin de Grado tiene un peso académico de 12 ECTS y se establece que 1 ECTS es equivalente a 25 horas, por lo tanto, este proyecto debe requerir un total de 300 horas de trabajo por parte del estudiante. La distribución de estas horas se establece en el apartado de planificación de este proyecto.

Publicación y propiedad intelectual

Este proyecto se puede publicar en acceso abierto, como publicación restringida a la comunidad universitaria o sin autorización de publicación. Esta obra se publicará en acceso abierto, para favorecer su libre difusión, de modo que el trabajo realizado se publica en el Repositorio Institucional de la Universidad y pasará a ser de libre acceso y gratuito a través de Internet. La licencia aplicada al documento será la Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España.

3.2. Entorno socio-económico

En el trabajo aparecen referencias y comentarios justificados respecto al marco socio-económico en que se ubica o incluye un presupuesto detallado y bien definido en todos sus conceptos.

3.2.1. Análisis del presupuesto

A continuación se analizan los costes directos e indirectos derivados del trabajo desarrollado en este proyecto. El presupuesto desglosado se encuentran en el Apéndice C del proyecto. El resumen de gastos totales se muestra a continuación.

Tabla 3.2: Costes totales del proyecto.

Tipos de costes		Costes (Euro)
Costes directos	Personal	8000.00
	Equipos	291.60
	Materiales	285.39
Costes indirectos		1715.40
Total		10292.39

Costes directos

Los costes directos incluyen los costes de materiales, equipamiento y mano de obra. Estos costes suman un total de 8576.99 €, de los cuales, al rededor de un 3 % son gastos de equipos, y otro 3 % son gastos de materiales.

De los costes directos de materiales se pueden extraer algunas conclusiones importantes acerca de este proyecto. Los materiales necesarios para la fabricación de la mano suponen un bajo coste, por lo que cumple con lo esperable de la solución elegida. El montaje permite su reutilización, es por ello que el precio total de la versión TPMG90-2 difiere en poco más de 2 € del precio total de los materiales del proyecto.

El precio de la mejorada TPMG90-2, supera los costes de TPMG90-1 en, aproximadamente, un 40 %. Esto se debe, principalmente, a la adición de componentes electrónicos para mejorar la tecnología anterior.

Costes indirectos

Los costes indirectos tienen relación con los servicios, instalaciones e infraestructuras de la Universidad. De acuerdo con el artículo 9, apartado 1, de la orden Orden ECC/1333/2015, para el cálculo de los costes indirectos de este proyecto se han de tener en cuenta el coste real de los gastos generales, estableciéndose un límite del 25 % del gasto de mano de obra de la actuación por anualidad y entidad [74].

Estos gastos indirectos pueden calcularse sin aportar justificantes de gastos, mediante la aplicación de un porcentaje dado, siguiendo los criterios mencionados con

anterioridad. Las normas de gastos de investigación de la Universidad Carlos III de Madrid, fijan este porcentaje en un 20 % de los costes directos [83]. Teniendo esto en cuenta, los costes indirectos finales suman un total de 1715.40 €.

3.2.2. Impacto socio-económico

Este capítulo muestra el impacto social y económico derivado de este proyecto, así como un hipotético plan de negocio del mismo. Demás consideraciones económicas se exponen en el estudio de viabilidad desarrollado en la sección posterior.

Impacto social

El impacto social de este proyecto se basa, principalmente, en el acercamiento de la tecnología -más, en concreto, de la robótica- no solo a la comunidad universitaria, sino a la sociedad en general.

A nivel universitario, el impacto educativo de esta mano reside en su facilidad de reproducción y su bajo coste. En carreras técnicas en las que el programa incluye una asignatura relacionada con el campo de la robótica, no todas las universidades cuentan con medios para acercar a los alumnos a entornos más prácticos. En otros casos, aunque las universidades cuenten con robots, su valor es demasiado elevado para permitir el acceso del alumnado a la experimentación. Mediante esta mano, las universidades pueden fomentar la investigación, permitir al alumnado enfrentarse a aplicaciones reales y, de este modo, favorecer el avance de la tecnología y, con ello, el avance de la sociedad y la creación de nuevos puestos de trabajo.

Este proyecto en concreto, puede encontrar múltiples funcionalidades en el marco de la enseñanza de la ingeniería biomédica o la biotecnología. En línea con este punto, es fundamental tener en cuenta que Dextra original parte de una propuesta de realizar una prótesis de mano asequible, que pueda ayudar a personas que hayan sufrido una amputación y no dispongan de capacidad económica para cubrir el precio al que se encuentran hoy en día las prótesis robóticas. Las mejoras implementadas en esta mano son mejoras que repercuten directamente en la persecución de este objetivo.

Impacto medioambiental

La mano robótica producida en este proyecto está impresa al 100 % en PLA, que se trata de un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Este material se produce a partir de recursos renovables, por lo que su impacto medioambiental es muy bajo,

especialmente comparado con plásticos derivados del petróleo [84].

Por otra parte, la mano está actuada completamente por componentes electrónicos, por lo que no existe riesgo de emisión de ningún tipo de gases y el único efecto a tener en cuenta es el gasto energético derivado de alimentar el circuito.

De acuerdo con los datos ofrecidos por la Red Eléctrica de España para abril de 2018, más del 50 % de la energía generada en ese mes en nuestro país proviene de fuentes renovables (ver figura 3.2), por lo tanto, el consumo de energía eléctrica en este proyecto se puede considerar de impacto medioambiental medio.

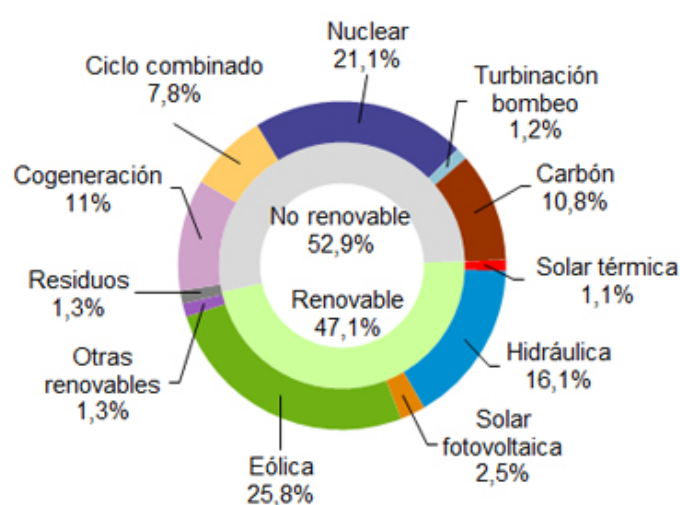


Figura 3.2: Generación del mes de abril del 2018³⁰. ©Red Eléctrica de España

Impacto económico

Los continuos avances en la robótica del último cuarto de siglo están logrando que los robots amplíen su abanico de funciones y campos de trabajo, y que, por consiguiente, estén más presentes en nuestra sociedad. Esto está generando un mercado emergente alrededor de este sector, que plantea como un futuro cada vez más cercano la posibilidad de contar con robots asistenciales en nuestros propios hogares.

Para la valoración del impacto económico de este proyecto a nivel global, se ha de considerar que, a pesar de partir de un modelo cuya licencia permite la explotación

³⁰ Red Eléctrica de España, La demanda de energía eléctrica aumenta un 5,7 % en abril, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/sala-de-prensa/notas-de-prensa/2018/04/la-demanda-de-energia-electrica-aumenta-un-5-7-en-abril>. [Accedido: 02-6-2016]

económica, el modelo actual no mantiene un propósito lucrativo. Esto se debe a que está enmarcado en el área de investigación de TEO en RoboticsLab y, por lo tanto, es dependiente de varias ramas aún en desarrollo y eso sitúa la comercialización del mismo como un objetivo a largo plazo.

El impacto económico más inmediato de las manos producidas para el robot humanoide TEO se encuentra intrínseco en la consideración del impacto social de TEO como asistente del hogar. Estas nuevas manos amplían y optimizan las funciones de manipulación asignadas al robot, aumentan su adaptación al medio y, en general, le permiten la ejecución de una gran cantidad de tareas que implican la utilización de las manos. Por lo tanto, el aporte de este trabajo acerca a TEO a su hito de convertirse en un robot asistente preparado para desenvolverse en entornos domésticos y, de este modo, lo aproximan a una posible comercialización.

Se ha de valorar que, por lo general, uno de los grandes inconvenientes a los que se enfrenta la investigación universitaria en España, en contraposición a otros territorios, como EE.UU., es la falta de medios para que la producción científica sea productiva en un sentido económico. Esto se logra, comúnmente, mediante la colaboración con otras empresas o proyectos privados. Con el propósito de que el papel del investigador se valore de igual modo que el resto de perfiles profesionales, en el siguiente subapartado se plantean casos hipotéticos de explotación, para que el proyecto resulte beneficioso. Para ello, se han de considerar escenarios ficticios en los que se valora el beneficio obtenible en actividades desarrolladas en entornos como ferias, conferencias y exposiciones patrocinadas por organismos privados y públicos.

Plan de negocio

Una forma rápida y efectiva de generar un plan de negocios vinculado al proyecto actual es el modelo Canvas, que es un sistema que permite analizar de forma visual su viabilidad. Este modelo se centra en la explotación de la mano robótica Dextra TPMG90-2 y se presenta como el preámbulo de la sección 3.3., en la cual se desarrolla un estudio de la viabilidad.

El modelo que se presenta en la figura 3.3, contempla la explotación de la mano robótica producida en este proyecto con orientación fundamental a la educación y el desarrollo de tecnología en el ámbito público y privado. Para ello, tiene en cuenta quienes serían los socios y suministradores claves, relacionándolos con sus actividades fundamentales. De igual modo, valora qué actividades requieren nuestra propuesta de valor y los recursos necesarios para conseguirlos, como son las relaciones con los clientes o los canales de comunicación. Para ello, se debe establecer de forma clara cuáles son los costes más importantes que enfrenta este proyecto, extraídos en gran medida

del presupuesto del mismo, y cuáles son las existentes o potenciales fuentes de ingresos.

SOCIOS CLAVE: <ul style="list-style-type: none"> - Universidad Carlos III de Madrid, como socio proveedor de financiación y proyección internacional - Empresas con especialización en robótica humanoide como PAL Robotics o Robotnik, como socios colaboradores - Pololu, como principal suministrador de hardware y promotor de promoción 	ACTIVIDADES CLAVE: <ul style="list-style-type: none"> - Exhibiciones - Conferencias - Seminarios - Talleres - Ferias 	PROPUESTAS DE VALOR: <ul style="list-style-type: none"> - Mano robótica antropomórfica de bajo coste - Propiedad de destreza - Fácilmente reproducible 	RELACIONES CON CLIENTES: <ul style="list-style-type: none"> - Demostraciones en departamentos - Repositorios colaborativos - Canal de atención al cliente 	SEGMENTOS DE CLIENTE: <ul style="list-style-type: none"> - Área de la robótica centrada en humanoides: empresas privadas e instituciones públicas y privadas. - Área de la robótica y la biomédica: prótesis de mano
	RECURSOS CLAVE: <ul style="list-style-type: none"> - Promoción mediante redes sociales o publicaciones - Financiación estable para la investigación y el desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> - Útil para la enseñanza - Referente para desarrollo de manos para humanoides - Aplicable al sector de la salud: prótesis de bajo coste 	CANALES: <ul style="list-style-type: none"> - Publicaciones universitarias - Oferta proyecto de fin de carrera - Redes sociales - Portales universitarios 	<ul style="list-style-type: none"> - Robótica social: multinacionales tecnológicas interesadas en robótica asistencial - Promoción hardware / software mediante aplicación
ESTRUCTURA DE COSTES: <ul style="list-style-type: none"> - Costes fijos: Salarios - Costes variables: Materiales, promoción, equipos... - Recursos más caros: Hardware (colaboración) 			FUENTES DE INGRESOS: <ul style="list-style-type: none"> - Promoción productos - Ponencias / cursos / ferias - Subvenciones del Estado 	

Figura 3.3: Lienzo del modelo de negocio CANVAS.

3.3. Estudio de viabilidad

Una buena práctica relacionada con el desarrollo de un proyecto, incluso a muy pequeña escala, es realizar un profundo análisis de las posibilidades de actuación y una evaluación su probabilidad de éxito, antes de embarcarse en él. Esta herramienta nos puede ofrecer una visión más realista de los beneficios que podría reportar el proyecto y orientarnos en una futura toma de decisiones.

3.3.1. Análisis: Alcance del proyecto

Definir los límites de los objetivos e identificar puntos fuertes y débiles del proyecto es el primer paso para analizar su viabilidad.

Alcance del proyecto

El propósito de este trabajo es el de proveer al robot humanoide TEO de unas manos robóticas antropomórficas que atiendan a unas especificaciones concretas. Nos hallamos, por lo tanto, ante un proyecto atribuible al sector de la robótica, enmarcado en el campo de la investigación y el desarrollo, que va a tener lugar en el entorno universitario.

La institución a la que se destina el resultado del trabajo y, por lo tanto, la parte que financia el proyecto, es la Universidad Carlos III de Madrid. En concreto, este trabajo se incluye en una de las líneas de investigación del equipo de RoboticsLab, que forma parte del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad.

Esta actividad se desarrolla con cargo parcial al proyecto de investigación “Fondos de agrupación” (nº de UXXI Investigación: 2012/00046/007) financiado por Universidad Carlos III de Madrid y bajo la dirección del investigador responsable D. Carlos Balaguer.

Los participantes del proyecto son:

- Juan C. González Vítores: Doctor Ingeniero Senior. Tutor / Director.
- Álvaro Villoslada: Ingeniero Senior. Co-tutor / Asesor.
- Jennifer J. Gago Muñoz: Ingeniera Junior. Técnica investigadora.

Análisis de la situación

Se evaluará la inversión y se considerarán como beneficios aquellos eventos promocionales que difundan el trabajo de la Universidad y eleven su estatus social y científico.

La Universidad Carlos III de Madrid publica las siguientes cifras de financiación / inversión en contratos y proyectos destinados al I+D en los años 2014-2016 (ver tabla 3.3)³¹.

³¹UC3M, Financiación, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hosting01.uc3m.es/InvestigaUc3m/2015-2016/carlos3/es/datos-universidad/>. [Accedido: 02-06-2018]

Tabla 3.3: Financiación de la investigación según tipo de actividad.

Año	Miles € recibidos	Miles € destinados contratos	Miles € destinados proyectos	% Inversión en I+D
2014	18630	3331	10062	84.82
2015	24528	3426	16089	59.12
2016	26713	2352	17651	70.93

Es destacable que el campo de I+D es el destinatario de la mayor parte de la financiación obtenida por la Universidad. La figura 3.4 muestra el origen de los fondos que recibe el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática entre los años 2012 y 2016³².

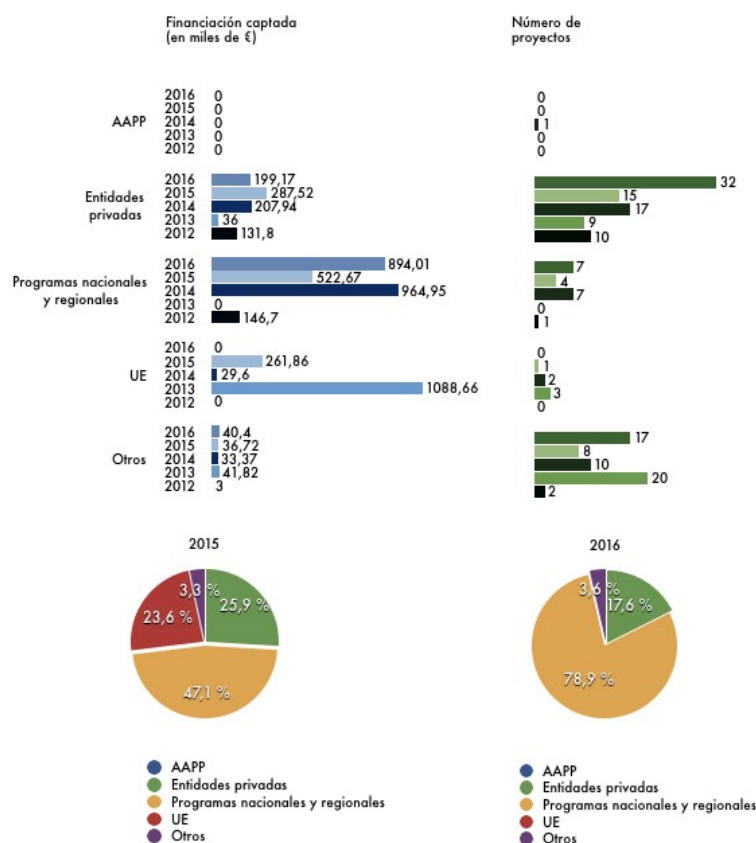


Figura 3.4: Origen de fondos - Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. ©UC3M

³²UC3M. Datos por departamento, 2016. Disponible en: <https://hosting01.uc3m.es/InvestigaUc3m/2015-2016/carlos3/es/departamento/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/>. [Accedido: 03-06-2018]

Tras las reflexiones extraídas del estudio del impacto económico del proyecto, era de esperar que dos de los grandes grupos de financiación fuesen programas nacionales y regionales y de financiación de la Unión Europea, como se muestra en el gráfico del 2005, donde el porcentaje de financiación por parte de entidades privadas es de poco más de un 25 %. Sin embargo en 2006 se observa un cambio radical en la distribución de la financiación, en el cual casi un 80 % de la financiación proviene de fondos públicos nacionales y menos de un 20 % de fondos privados, lo que confirma aún más la necesidad de enfocar la investigación española al sector privado para lograr equilibrar la balanza de ingresos.

Teniendo esto en cuenta, manteniendo como socio clave a la UC3M, la búsqueda de nuevos socios en el sector privado debería impulsar el alcance del proyecto y favorecer su viabilidad. Las propuestas de valor de este proyecto, que favorecerán su expansión, se exponen en el lienzo del modelo de negocio CANVAS expuesto en la sección anterior.

3.3.2. Definición de requisitos y enfoque

El enfoque actual requiere del rediseño y prueba de varios o todos los componentes de la mano robótica, por lo que se dispone del siguiente diagrama de flujo (figura 3.5) para orientar los mecanismos de desarrollo de cada versión. Hasta producir la versión definitiva, todos los componentes que puedan reutilizarse, son reutilizados en nuevas versiones de la mano. En este proceso se cuenta con la financiación proveniente de la Universidad Carlos III de Madrid.

A partir de la producción definitiva de la mano preparada para ser expuesta al público son varias las vías de actuación que pueden considerarse para lograr un beneficio del trabajo generado. Las actividades principales consideradas para este propósito se basan en ponencias y talleres relacionados con la creación y el control de la mano robótica.

Un plan de negocios adecuado parte de una promoción del producto. En este caso, una posible vía para alcanzar la internacionalización de proyecto es lograr un espacio en conferencias como IROS (*International Conference on Intelligent Robots and Systems*) 2018, que tendrá lugar en octubre, en Madrid. Los medios de promoción pueden consistir en una publicación, un taller, un tutorial, un vídeo o asistir en calidad de actividad emprendedora. Otros recursos para obtener promoción nacional, consistirían en la realización de ponencias en universidades españolas.

Una posible colaboración comercial surge de la fuerte inclinación hacia el hardware de Pololu en la fabricación de esta mano. Toda la electrónica utilizada, a excepción del servomotor, son productos de este fabricante. De hecho, ya se ha producido un avance en este campo, mediante la promoción de Pololu del proyecto original en su blog

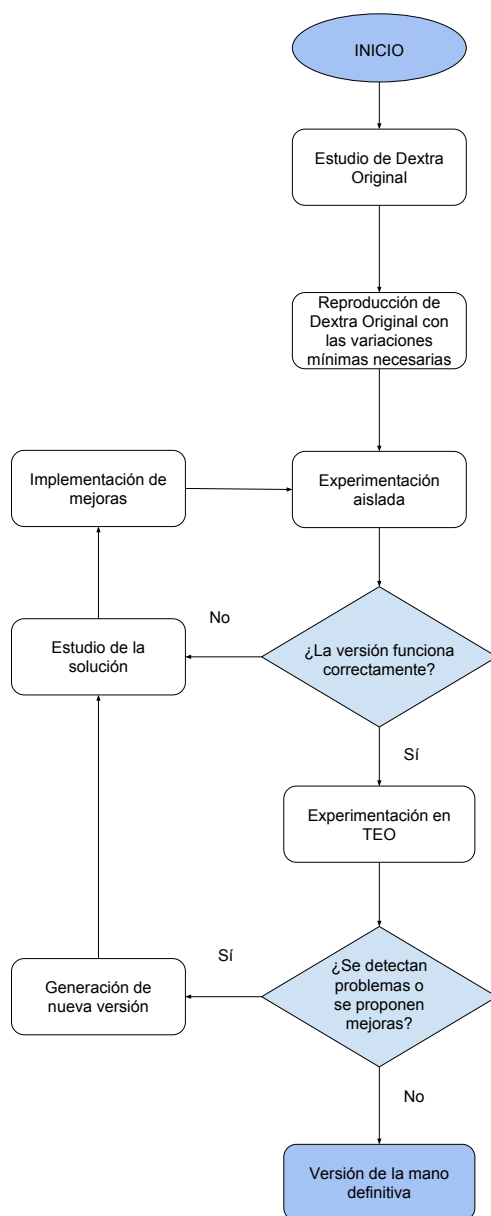


Figura 3.5: Nuevos cables para conectar los encoders de la mano al circuito.

del producto de los micro-motores³³. Si se considera la posibilidad de adaptar la mano para la utilización de un servomotor Pololu, se podría trazar un programa colaborati-

³³Pololu. On the blog, 2018. [En línea] Disponible en <https://www.pololu.com/product/2373/blog>. [Accedido: 02-06-2016]

vo con la empresa, para así programar una serie de conferencias, cursos y seminarios para promocionar el potencial del producto, a cambio de un acuerdo beneficioso en el suministro del producto, que reduzca los costes de materiales.

Las vías de comunicación son un punto importante a tener en consideración. En la sociedad actual, el uso de redes sociales es una herramienta fundamental para lograr el éxito de un producto. Por este motivo, la inversión en la creación de una imagen corporativa del producto en internet, mediante vías como LinkedIn, YouTube o Instagram, suponen un paso necesario para la consecución de una alta rentabilidad.

3.3.3. Evaluación y revisión de la viabilidad

Examinar la rentabilidad del enfoque seleccionado y revisar el estudio realizado son los últimos pasos necesarios para completar un estudio de viabilidad y dar el visto bueno a la puesta en marcha del proyecto.

Evaluación de viabilidad

Un análisis del coste total del proyecto se divide en costes directos, como materiales, costes de equipos y costes laborales; y de costes indirectos, tal y como se muestra en el presupuesto del proyecto.

Tenemos que el coste de materiales para la producción de una única mano robótica Dextra TPMG90-2 es de 283.32 €. Teniendo en cuenta los precios actuales de manos robóticas comerciales están entre los 3000 € y los 60000 €, esta es una cifra muy competitiva y se sitúa, entre las opciones más económicas de las manos robóticas de bajo coste.

El valor del proyecto suma un total de 10292.39 €, lo cual, tomando como referencia los últimos datos publicados de 2016 por la UC3M, supone un 0.9 % de la financiación anual obtenida por el Departamento (1133.58 miles de €) y solo un 0.03 % de la financiación obtenida por la universidad (26713 miles de €). Estos datos encajan adecuadamente dentro de los porcentajes destinados a la investigación a ambas escalas.

Para obtener una idea aproximada del impacto económico del proyecto, se puede calcular la rentabilidad sin tener en consideración ningún tipo de beneficio, para analizar el valor relativo de la eficiencia del negocio si no se sometiese a explotación económica. Para ello, se considera como inversión inicial los fondos destinados a investigación en el Departamento en 2016, a modo de referente aproximado.

$$Rentabilidad = \frac{ValorActual - ValorInicial}{ValorInicial} \times 100 \quad (3.1)$$

$$ValorActual = ValorInicial - CostesTotales = 1000057,61 \quad (3.2)$$

$$Rentabilidad = \frac{1000057,61 - 1010350}{1010350} \times 100 = -1,02 \% \quad (3.3)$$

Como era de esperar, al no tener en cuenta ninguna fuente de ingresos 3.3, el resultado de la rentabilidad es negativo y, por lo tanto, el beneficio y la eficiencia del proyecto son nulos. El impacto que esta rentabilidad negativa supone para la universidad, en comparación con el beneficio que se obtiene del desarrollo de la investigación en este proyecto, es justificable, teniendo en consideración que se contribuye a mejorar indicadores de calidad de la universidad como la reputación académica y las citaciones por facultad, que permiten elevar su estatus, lo que deriva en una potenciación de su elegibilidad para recibir fondos de distintas fuentes.

Un modo de reducir aún más el valor negativo de la rentabilidad sería, como se comenta al comienzo de este estudio, colaborar con las empresas suministradoras de hardware (puesto que el hardware es el material más caro recogido en el presupuesto) para establecer acuerdos de colaboración y así reducir costes.

Para conseguir una rentabilidad positiva, sería necesario obtener beneficios económicos de las actividades que se plantean como actividades clave en el lienzo del modelo de negocio CANVAS, como seminarios o talleres, en los cuales el principal cliente sería la comunidad universitaria en el sector público y empresas punteras en el campo de la robótica, en el sector privado.

Conclusiones

Económicamente, el proyecto demuestra ser viable. Los fondos de los que parte este proyecto permiten el desarrollo de este trabajo al nivel departamental. Aún existiendo varias vías de actuación para la obtención de beneficios económicos, queda probado que el impacto económico producido sin considerar la explotación comercial es muy bajo y queda eclipsado por los beneficios retribuidos a la Universidad y a la sociedad, derivados de la publicación de esta obra.

Capítulo 4

Dextra original

En este capítulo se muestran las especificaciones y se realiza un estudio exhaustivo de la mano robótica Dextra original a nivel mecánico, electrónico y de software, como preámbulo a la fabricación de la misma.

Dextra es una mano robótica imprimible de proporciones humanas que se está desarrollando como parte de un proyecto personal, destinado a producir una prótesis de mano robótica asequible y de código abierto (figura 4.1). Las ventajas de diseño de Dextra son: agarre adaptativo, tamaño compacto, simplicidad mecánica y facilidad de reproducción.

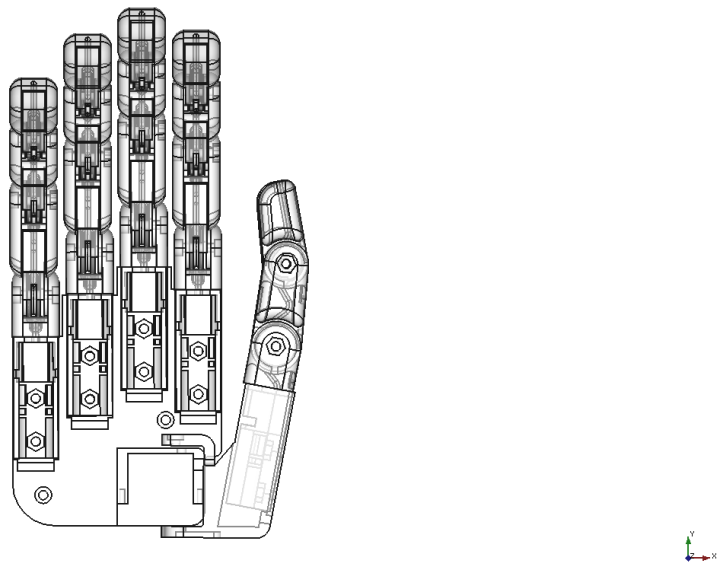


Figura 4.1: Diseño mano robótica Dextra.

El elemento principal de Dextra es el dedo modular. Los cuatro dedos son intercambiables, y el pulgar es una variación de los demás dedos. El dedo modular comprende el dedo mecánico imprimible, el actuador y un codificador. El actuador compacto utiliza un micro motor de corriente continua para girar un carrete que enrolla un hilo de pescar, convirtiendo el movimiento de rotación del motor en un movimiento lineal.

La posición de cada dedo se controla mediante un bucle PID que utiliza el valor proporcionado por el codificador magnético del motor como señal de realimentación (ver figura 4.2). Para ser controlado directamente por un usuario que haya sufrido una amputación, Dextra utiliza una interfaz EMG que utiliza las señales mioeléctricas del usuario como la entrada de control de alto nivel³⁴.

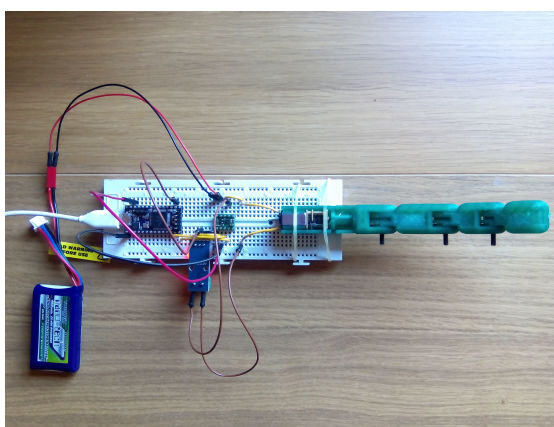


Figura 4.2: Dedo modular de Dextra. ©Á. Villoslada

4.1. Mecánica - Análisis funcional

El diseño mecánico de Dextra es un diseño compacto, en el que se aprovecha prácticamente todo el espacio útil. El dedo modular está formado por el motor Micro Metal Gear Pololu 1000:1 como actuador lineal; retroalimentación de posición, proporcionada por un codificador magnético; y el dedo mecánico impreso. Este módulo se usa en los cuatro dedos de la mano, y el pulgar es una variación del mismo diseño formado por solo dos falanges. El diseño modular simplifica el ensamblaje y la reparación y también puede favorecer la posibilidad de modificar el diseño original, lo que resulta de especial interés en este caso.

³⁴Á. Villoslada, Dextra description, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra>. [Accedido: 09-10-2017]

4.1.1. Subactuación y grip adaptativo

Cada dedo posee tres GDL y un motor, mientras que el pulgar tiene dos GDL y un motor. Además de eso, la abducción / aducción del pulgar es accionada independientemente por un servomotor. Eso suma un total de quince GDL y seis actuadores.

El sistema de transmisión de los dedos, que está subactuado, se basa en un mecanismo movido por un tendón: el movimiento de los actuadores rotatorios ubicados en la palma de la mano se transmite a los dedos a través de un hilo de pescar que actúa como un tendón artificial.

El mecanismo del dedo funciona de la siguiente manera. Para doblar el dedo, el motor gira un carrete que enrolla el tendón. El movimiento de rotación del motor se convierte en un movimiento lineal paralelo a su eje. El tendón se dirige a través del dedo y se fija a la falange distal. Cuando el tendón es rodado por el carrete del actuador, el dedo se flexiona, y cuando se desenrolla, las gomas elásticas ubicadas en las articulaciones de la falange extienden el dedo. El canal del tendón dentro del dedo está diseñado en forma de “S” de tal manera que el dedo está diseñado para seguir una secuencia de cierre específica (ver figura 4.3). La falange proximal es la primera que se cierra, seguida por la falange medial y finalmente por la falange distal. De esta manera, el cierre del dedo puede adaptarse a cualquier forma.

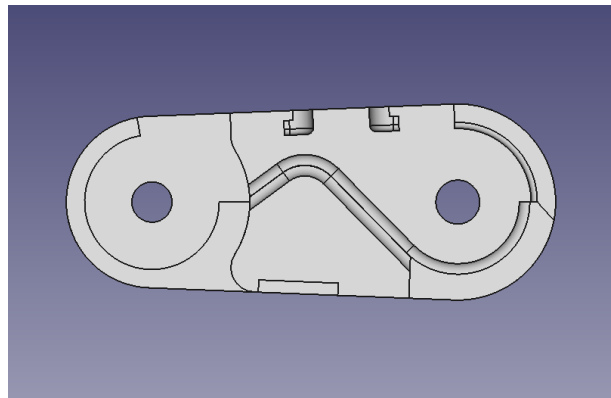


Figura 4.3: Corte transversal de falange media.

La subactuación por tendón permite que una falange se pueda mover aunque la anterior esté bloqueada, lo que hace que el dedo se adapte a la forma de una amplia variedad de objetos. Gracias a este diseño mecánico, Dextra puede realizar agarres adaptativos. Las capacidades de agarre de Dextra se representan gráficamente en la imagen a continuación, donde se reproducen 12 de los 16 agarres de la taxonomía de

Cutkosky³⁵ (figura 4.4). Se estudiará, en futuras versiones desarrolladas, si este análisis de agarre de Dextra sufre alguna variación.

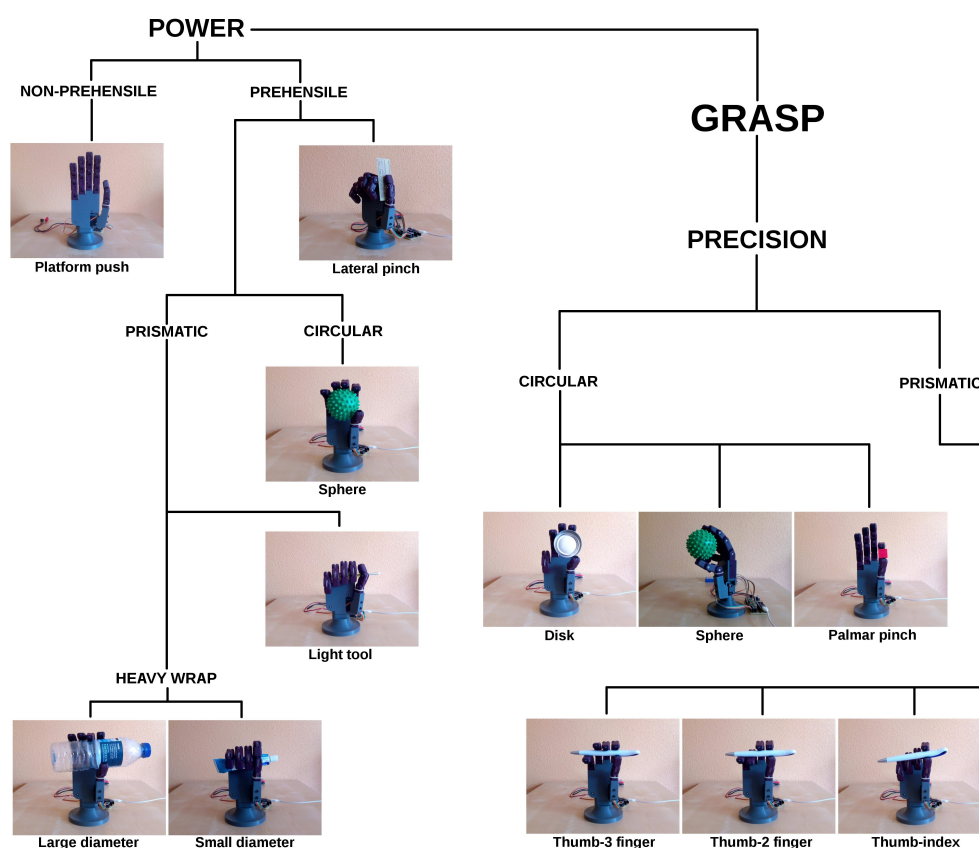


Figura 4.4: Taxonomía de agarre de Cutkosky - Dextra original. ©Á. Villoslada

4.1.2. Posición de la mano para el agarre

El agarre fundamental a desarrollar con la mano para la manipulación de textiles es el agarre en punta. La figura 4.5 demuestra que este agarre se puede desarrollar sin dificultad. Existen variaciones del mismo, con distintos grado de flexión de las falanges del índice y pulgar, por lo que la imagen muestra tan solo una configuración recomendada.

³⁵ Á. Villoslada, Reproducing Cutkosky grasp taxonomy, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra/log/47058-reproducing-the-cutkoskygrasp-taxonomy>. [Accedido: 10-11-2017]

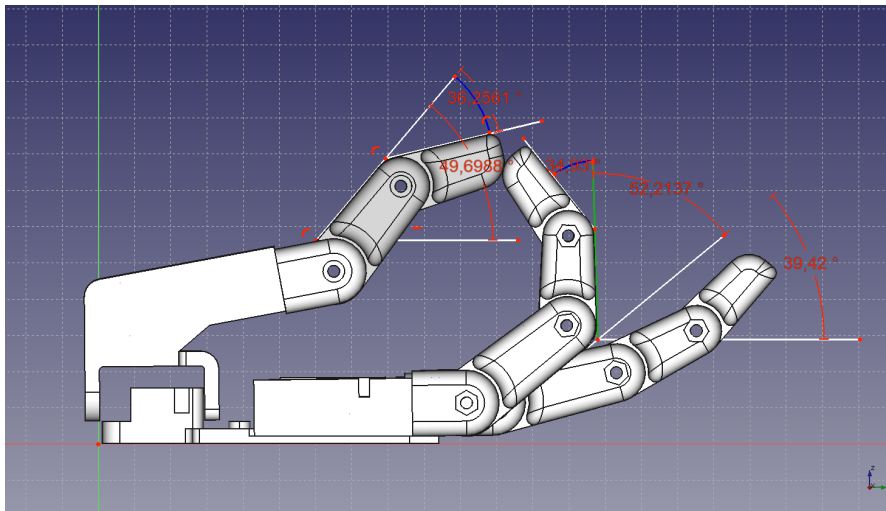


Figura 4.5: Posición de índice y pulgar para agarre de punta.

Los ángulos utilizados para la ejecución del agarre en punta se pueden encontrar en la tabla 4.1. Para evaluar el giro, se establecen como condiciones iniciales de que el pulgar esté completamente abierto (90° según la figura superior) y que el dedo índice también esté completamente estirado (0° según la figura superior). El dedo pulgar ha de estar completamente abducido.

Tabla 4.1: Ángulos para agarre en punta de Dextra original.

Dedo	Falange	Giro absoluto ($^\circ$)	Giro relativo ($^\circ$)
Índice	Proximal	39.420	39.420
	Media	91.634	52.214
	Distal	126.564	34.930
Pulgar (abducido)	Proximal	40.301	40.301
	Distal	76.557	36.256

4.1.3. Estudio cinemático directo

Se procede a realizar un estudio cinemático para evaluar el movimiento del mecanismo de la mano, formado por cinco dedos móviles. Dos consideraciones a tener en cuenta son; por una parte, que cuatro de los cinco dedos estudiados son iguales, por lo que los resultados serán concluyentes con analizar la cinemática de uno de esos dedos y el pulgar; por otra parte, que los dedos de Dextra no parten de posiciones ideales de horizontalidad / verticalidad, sino que el diseño mecánico les dota de una ligera flexión

inicial, por lo que para este estudio se procede a realizar una simplificación y se asume que las posiciones de inicio son ideales, con los ejes alineados.

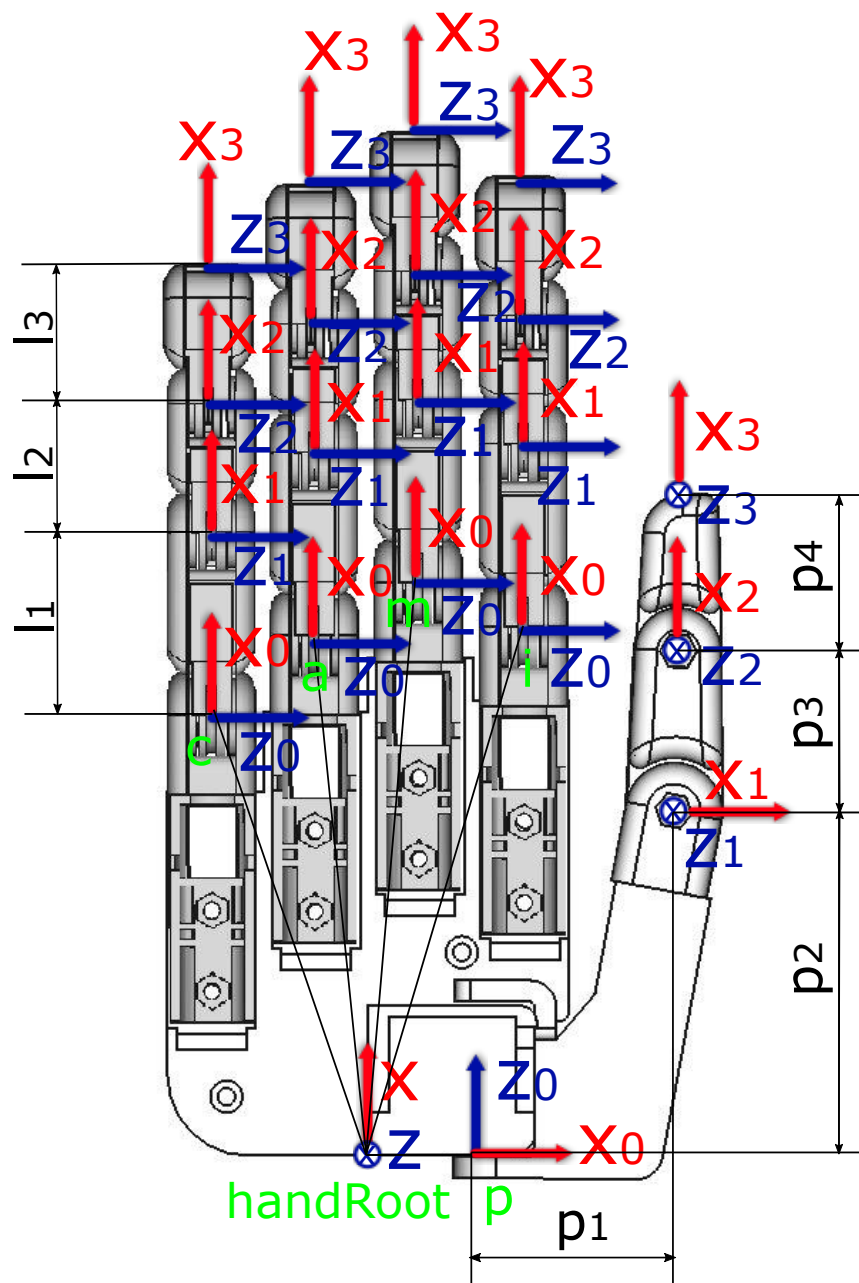


Figura 4.6: Sistemas de referencia de mano original.

Definida en la figura 4.6 la ubicación de los sistemas de coordenadas en cada uno de los dedos de la mano, se continúa con la obtención de los parámetros ϑ_i , d_i , a_i y α_i , del algoritmo de Denavit-Hartenberg. Estos parámetros se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2: Parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg para dedos “i”, “m”, “a” y “c”.

Estabón	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1^*	0 mm	l_1	0°
2	q_2^*	0 mm	l_2	0°
3	q_3^*	0 mm	l_3	0°

Tabla 4.3: Parámetros del algoritmo de Denavit-Hartenberg para dedo “p”.

Estabón	ϑ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1^*	p_1	p_2	90°
2	$q_2^* + 90^\circ$	0 mm	p_3	0°
3	q_3^*	0 mm	p_4	0°

El análisis cinemático de los dedos “i”, “m”, “a” y “c” se puede realizar directamente, mientras que el análisis del dedo “p” requiere la obtención de la matriz de transformación homogénea. En la tabla 6.1, se exponen los valores de los parámetros de longitud.

Tabla 4.4: Valores de los parámetros de longitud de la figura 4.6

Longitud	Valor (mm)
l_1	34.95
l_2	24.88
l_3	26.49
p_1	34.12
p_2	67.92
p_3	29.65
p_4	29.41

Resolución del problema de cinemática directa para “i”, “m”, “a” y “c” se muestra en las ecuaciones 4.1 y 4.2.

$$x = l_1 \cdot \cos(q_1^*) + l_2 \cdot \cos(q_1^* + q_2^*) + l_3 \cdot \cos(q_1^* + q_2^* + q_3^*) \quad (4.1)$$

$$y = l_1 \cdot \sin(q_1^*) + l_2 \cdot \sin(q_1^* + q_2^*) + l_3 \cdot \sin(q_1^* + q_2^* + q_3^*) \quad (4.2)$$

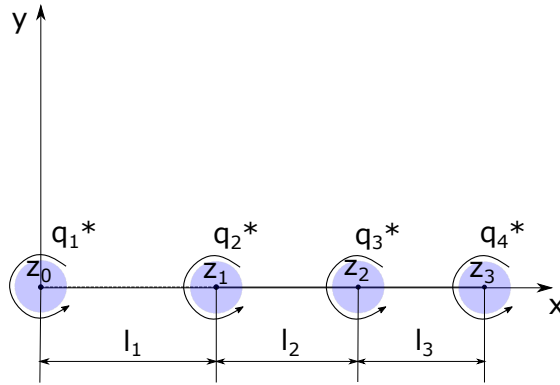


Figura 4.7: Dedo tipo “i”, “m”, “a” y “c” en ejes x e y para estudio cinemático directo.

Resolución del problema de cinemática directa para “p” mediante matrices de transformación homogénea, se muestra a continuación.

$${}^0H_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1^*) & -\text{sen}(q_1^*) & 0 & p2 \cdot \cos(q_1^*) \\ \text{sen}(q_1^*) & \cos(q_1^*) & 0 & p2 \cdot \text{sen}(q_1^*) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p1 \cdot \cos(90^\circ) \\ 0 & \cos(90^\circ) & -\text{sen}(90^\circ) & p1 \cdot \text{sen}(90^\circ) \\ 0 & \text{sen}(90^\circ) & \cos(90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$${}^1H_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2^* + 90^\circ) & -\text{sen}(q_2^* + 90^\circ) & 0 & p3 \cdot \cos(q_2^* + 90^\circ) \\ \text{sen}(q_2^* + 90^\circ) & \cos(q_2^* + 90^\circ) & 0 & p3 \cdot \text{sen}(q_2^* + 90^\circ) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$${}^2H_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_3^*) & -\text{sen}(q_3^*) & 0 & p4 \cdot \cos(q_1^*) \\ \text{sen}(q_3^*) & \cos(q_3^*) & 0 & p4 \cdot \text{sen}(q_3^*) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Habiendo presentado las matrices de transformación homogéneas parciales, se obtiene la matriz de transformación homogénea total correspondiente al dedo “p”, mediante la multiplicación de las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5.

$${}^0H_3 = {}^0H_1 \times {}^1H_2 \times {}^2H_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

La solución a los parámetros de la matriz de transformación homogénea total (ver ecuación 4.6), calculados a través de MATLAB, se presentan a continuación.

$$n_x = -\cos(q_1) * \cos(q_2) * \sin(q_3) - \cos(q_1) * \cos(q_3) * \sin(q_2)$$

$$n_y = -\cos(q_2) * \sin(q_1) * \sin(q_3) - \cos(q_3) * \sin(q_1) * \sin(q_2)$$

$$n_z = \cos(q_2) * \cos(q_3) - \sin(q_2) * \sin(q_3)$$

$$o_x = \cos(q_1) * \sin(q_2) * \sin(q_3) - \cos(q_1) * \cos(q_2) * \cos(q_3)$$

$$o_y = \sin(q_1) * \sin(q_2) * \sin(q_3) - \cos(q_2) * \cos(q_3) * \sin(q_1)$$

$$o_z = -\cos(q_2) * \sin(q_3) - \cos(q_3) * \sin(q_2)$$

$$a_x = \sin(q_1)$$

$$a_y = -\cos(q_1)$$

$$a_z = 0$$

$$P_x = p_2 * \cos(q_1) - p_1 * \sin(q_1) - p_3 * \cos(q_1) * \sin(q_2) - p_4 * \cos(q_1) * \cos(q_2) * \sin(q_3) - p_4 * \cos(q_1) * \cos(q_3) * \sin(q_2)$$

$$P_y = p_1 * \cos(q_1) + p_2 * \sin(q_1) - p_3 * \sin(q_1) * \sin(q_2) - p_4 * \cos(q_2) * \sin(q_1) * \sin(q_3) - p_4 * \cos(q_3) * \sin(q_1) * \sin(q_2)$$

$$P_z = \cos(q_2) + p_4 * \cos(q_2) * \cos(q_3) - p_4 * \sin(q_2) * \sin(q_3)$$

Por último, en la tabla 4.5, se presentan las transformaciones de rotación y traslación necesarias para obtener las matrices de transformación homogéneas desde *handRoot* hasta cada uno de los dedos.

Tabla 4.5: Tabla de transformaciones para Dextra original

handRootH_p	$\text{Rot}_Z(90^\circ) * \text{Rot}_X(90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{px})$
handRootH_i	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{ix}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{iy})$
handRootH_m	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{mx}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{my})$
handRootH_a	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{ax}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{ay})$
handRootH_c	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{cx}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{cy})$

4.2. Electrónica - Análisis hardware

En su estado actual, el movimiento de los dedos de Dextra está controlado por un lazo de control de posición. Como el dedo está subactuado, la posición angular de cada falange no se puede controlar de forma independiente. En cambio, se controla la posición angular total del dedo, es decir, la suma de los tres ángulos de la articulación³⁶.

Cada dedo está controlado por un lazo PID que toma un punto de ajuste de posición como entrada y usa la posición de retroalimentación medida por un codificador de cuadratura magnética para ajustar la posición real del motor de CC que impulsa el dedo.

Para obtener una mano robótica funcional; la fuerza ejercida al agarrar objetos también debería controlarse, para evitar romperlos y dañar la mano. Por esta razón, una de las líneas de investigación abiertas se trata de un controlador de fuerza para operar junto con el controlador de posición. Este controlador usa la corriente dibujada por el motor para obtener una estimación de la fuerza total ejercida por el dedo.

4.2.1. Actuadores

Los seis actuadores que componen la electrónica de Dextra son cinco micro-motores con eje extendido Pololu HP 1000:1, encargados de la flexión y extensión de cada uno de sus dedos; y un servomotor Turnigy TGY-EX5252MG Twin BB, encargado de la abducción del pulgar.

Estos actuadores están integrados en el diseño de la mano. En la figura 5.5 se puede observar el espacio reservado para estos motores, todos ellos ocultos tras la pieza que simula la palma de la mano.

³⁶Á. Villoslada, Project details for Dextra, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra/details>. [Accedido: 09-10-2017]

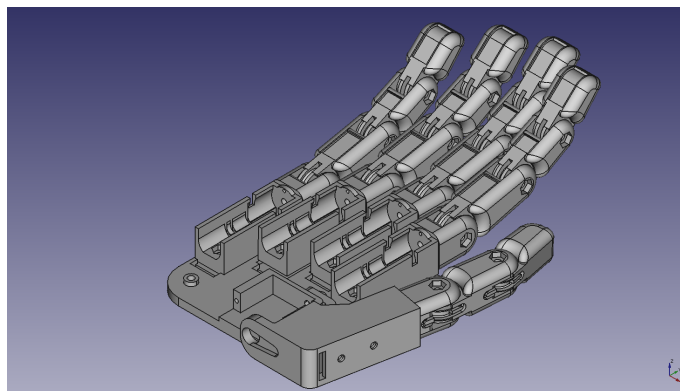


Figura 4.8: Mano robótica Dextra sin palma, para estudio interior.

4.2.2. Sensores

La mano original cuenta con 5 encoders magnéticos de efecto Hall, del fabricante Pololu, para determinar la posición de los micro-motores. Gracias al eje extendido de los motores, el disco magnético se puede acoplar al actuador una vez se ha soldado la placa del sensor (ver figura 4.9).



Figura 4.9: Encoders magnéticos acoplados a micro-motores Pololu HP 1000:1.

Como se explica en el estado del arte, este tipo de placa detecta la rotación del disco magnético. Estos discos tienen 6 polos, por lo que la placa codificadora detecta la rotación del disco proporcionando una resolución de 12 conteos por revolución del eje.

Algunas pruebas actuales con Dextra incluyen el uso de sensores de corriente lineal basado en efecto Hall completamente integrado para el control de fuerza³⁷.

³⁷Á. Villoslada, First force control tests, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra/log/46848-first-force-control-tests>. [Accedido: 14-11-2017]

4.2.3. Control

El control se ejecuta mediante la placa Teensy 3.1, que, como se explica en el estudio de la electrónica en capítulos anteriores, es una placa de bajo coste diseñada por PJRC. Cuenta con un procesador Cortex-M4 de 32 bits y permite la utilización de comunicaciones por CAN bus mediante la librería FlexCAN.

Por otra parte, el control bidireccional de los motores Pololu se realiza mediante unos controladores de la misma marca (DRV8838) que suministran corrientes continuas de 1.7 A y tiene un rango de voltaje operativo de 0 - 11 V, por lo que está especialmente recomendado para su utilización con motores pequeños o de baja tensión. Además, incorporan protección contra tensiones inversas, bajo voltaje y excesos de corriente y temperatura³⁸.

4.2.4. Circuito

El circuito electrónico de la mano original se puede encontrar en el Apéndice de este documento (ver figura D.1). En el esquemático, se puede observar que se dejan varios conectores libres con el propósito de conectar componentes adicionales en desarrollos futuros.

La lógica se alimenta directamente con los 3.3 V de salida de Teensy. La alimentación del resto del circuito se produce mediante una batería que suministra 11.1 V. Puesto que esta tensión es excesiva para los requisitos del circuito, se hace uso de un regulador de voltaje LM7806 TO-220, tal y como se muestra en la figura 4.10.

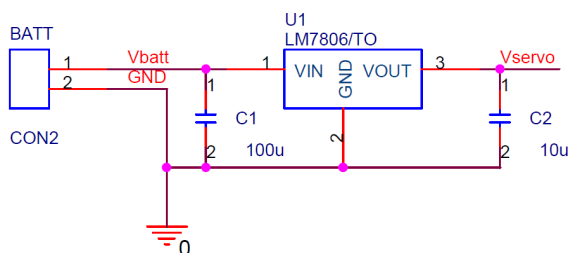


Figura 4.10: Regulación de voltaje de alimentación. ©Á. Villoslada

En la figura superior, el primer condensador, de 100 uF, se conecta entre la batería y la entrada del regulador, por lo que se encarga de filtrar cualquier ruido por parte de la fuente, derivando la señal de corriente alterna a tierra y dejando pasar solo la señal de corriente continua. Además, el condensador de 10 uF colocado a la salida, tiene el

³⁸Pololu, DRV8838 Single Brushed DC Motor Driver Carrier, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.pololu.com/product/2990>. [Accedido: 14-11-2017]

propósito de filtrar, de nuevo, cualquier ruido o señal de alta frecuencia no deseada. Estas medidas nos garantizan que el circuito esté alimentado con un voltaje preciso.

4.3. Software - Análisis interfaces humano-robot

Dextra puede controlarse enviando comandos desde un ordenador mediante una interfaz de usuario (GUI) o usando señales mioeléctricas (EMG).

4.3.1. Interfaz GUI

La interfaz GUI (figura 4.11) permite mover cada dedo individualmente desde un PC, usando una conexión en serie para comunicarse con el microcontrolador Dextra. Una vez que se logra la posición deseada, es posible almacenarla para un uso posterior y combinarlas para realizar diferentes movimientos y comportamientos, lo cual resulta especialmente útil para el caso de TEO, en el que la reiteración de ciertos tipos de agarres está garantizada. Como la GUI está programada en Python, es posible integrar estas poses almacenadas en otros proyectos paralelos.

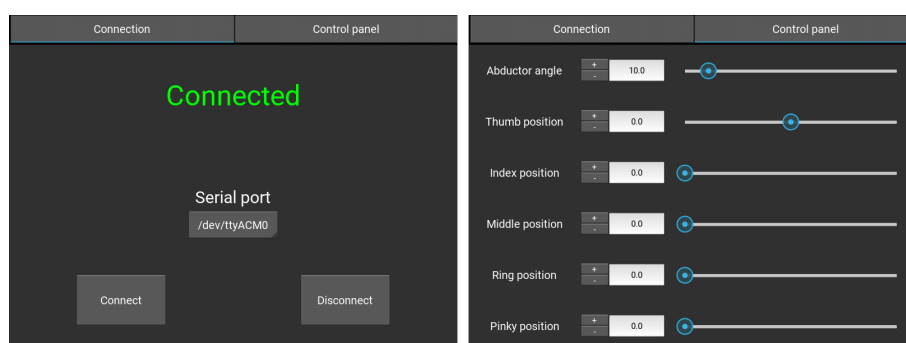


Figura 4.11: Interfaz GUI ©Á. Villoslada

El control se ha desarrollado mediante el protocolo de comunicación en serie Synapse, basado en el protocolo de comunicación seCo. El protocolo envía la posición de cada dedo y del abductor del pulgar en un formato de número de coma flotante convertido a formato binario, cada valor con un identificador. Todos estos valores se empaquetan en un mensaje delimitado por un encabezado y un pie de página y con una suma de comprobación para verificar la integridad del mensaje transmitido³⁹.

³⁹Á. Villoslada, Development of the Dextra control GUI, 2016. [En línea] Disponible en: <https://hackaday.io/project/9890-dextra/log/45586-development-of-the-dextra-control-gui>. [Accedido: 15-11-2017]

Para utilizar la mano en TEO, es deseable que todos los dedos puedan llegar a moverse simultáneamente mediante el programa de control, para agilizar las acciones de agarre y manipulación.

4.3.2. Interfaz de electromiografía (EMG)

La interfaz EMG, llamada *Mumai*, es la utilizada para implementar el segundo tipo de control. Se implementa un controlador de umbral mioeléctrico: la señal EMG en bruto proporcionada por la interfaz EMG se rectifica y suaviza mediante software y cuando esta señal procesada supera un cierto valor, la mano se cierra. Se implementó un sistema de reconocimiento de patrones de prueba de concepto en Python para mostrar cómo se pueden usar las señales EMG para clasificar los diferentes gestos de las manos.

Capítulo 5

Dextra TPMG90-1

La primera reproducción de la mano, Dextra TPMG90-1, pretende replicar la Dextra original, introduciendo las modificaciones y mejoras mínimas necesarias para su aplicación fundamental, para su prueba y comparación con versiones futuras.

5.1. Mecánica

La disponibilidad del servomotor Turnigy, utilizado en la Dextra V1, es muy limitada en Europa. Con el propósito de evitar demoras innecesarias relativas a aduanas, se procede a buscar un sustituto similar, que además resulte más accesible y permita así la fácil reproducción de la mano.

Tras un estudio exhaustivo de la oferta disponible, se concluye que la mejor opción era el servomotor TowerPro MG90. Se puede observar el alto parecido entre ambos motores en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Comparación servomotores Dextra original y TPMG90-1

Motor	Turnigy TGY-EX5252MG	TowerPro MG90
Peso	12g	14g
Medidas	23.3 x 9.4 x 26mm	23.1 x 12.2 x 29.0 mm
Velocidad 4.8V	0.12 s/60°	0.11 s/60°
Velocidad 6V	0.10 s/60°	0.10 s/60°
Par torsión 4.8V	2.4 Kg/cm	2.2 Kg/cm
Par torsión 6V	2.8 Kg/cm	2.5 Kg/cm

5.1.1. Variaciones en diseño mecánico

Tres componentes mecánicos de Dextra original se rediseñan con FreeCAD por la necesidad de adaptarlos al nuevo servomotor, debido a sus dimensionales (figura 5.1). Se mide el servomotor con un calibre y se realiza un modelo CAD. Se comprueba que sobresale por la parte inferior de la mano, sobrepasaba el ancho de esta y no cuadraban los agujeros necesarios para fijarlo a la pieza.

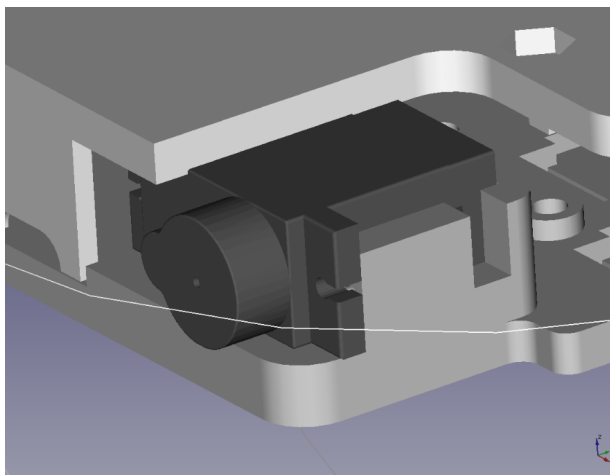


Figura 5.1: Dextra TPMG90-1 - Problema con el servomotor TowerPro

Es importante apuntar que las modificaciones de las piezas que se muestran a continuación se han realizado con la intencionalidad de ganar los milímetros necesarios para que el dedo pulgar pueda oponerse hasta el punto medio entre el dedo índice y el dedo corazón y, de este modo, lograr ampliar el número de tipos de agarre disponibles, como el agarre de trípode (ver taxonomía de Cutkosky en figura 2.9 en el apartado de Estado del Arte). Cuanto más pueda oponerse el dedo pulgar, dentro de los límites de la propia palma, más antropomórfica será la mano que obtendremos.

Las modificaciones realizadas a las piezas dorsal, abductor y palma se listan a continuación:

■ Dorsal

- Nuevo contenedor del motor. Necesidad de adaptar el tamaño y la posición de los agujeros, además de eliminar la plataforma inferior.
- Desplazamiento del agujero del dorsal para que encaje con la palma.

■ Abductor

- Ampliación del hueco interno que acoge al motor.
- Modificación de la zona del abductor en la que encaja la hélice del servo.

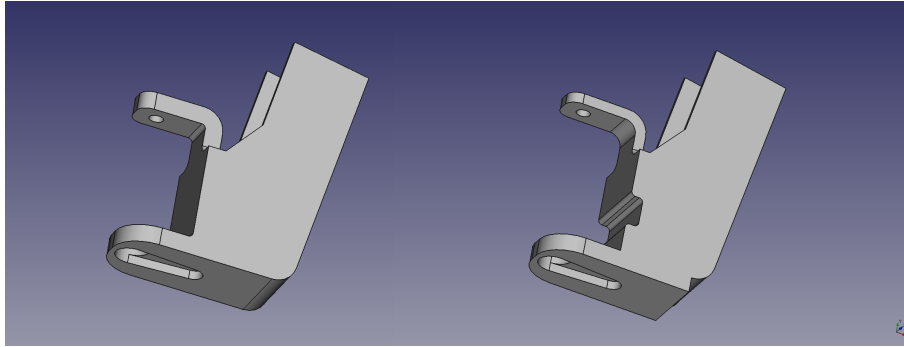


Figura 5.2: Abductor original (izqda.) vs. abductor TPMG90-1 (dcha.)

■ Palma

- Rediseño del hueco destinado a permitir el giro del abductor.
- Por cuestiones de espacio, cambio del agujero anteriormente mencionado en la pieza del dorsal.

Finalmente, las piezas rediseñadas encajan satisfactoriamente, tal y como se muestra en la figura 5.3.

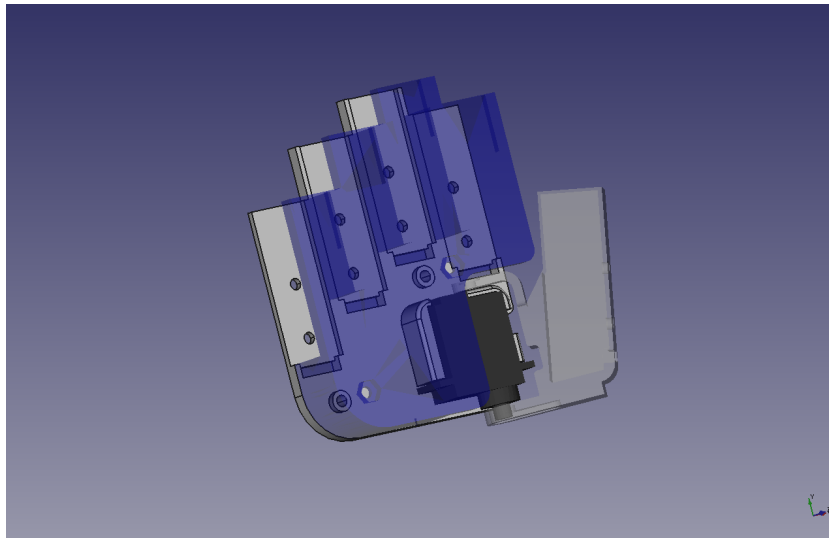


Figura 5.3: Dextra TPMG90-1 - Piezas modificadas.

5.1.2. Impresión y ensamblaje

Para el ensamblaje de la Dextra TPMG90-1, se utilizaron los materiales descritos en el Apéndice A.2 y las piezas que se muestran en la figura 5.4.



Figura 5.4: Componentes Dextra TPMG90-1

El primer dedo se imprimió en una impresora 3D Prusa I3 Anet A8, mediante el software de impresión 3D Cura. Debido al mal acabado y la falta de precisión en las piezas que, con posterioridad, serían encajadas, se decidió utilizar una mejor impresora, con un extrusor de mayor calidad. Por lo tanto, todas las piezas impresas de la versión TPMG90-1 fueron producidas en PLA (1.75mm) por una impresora 3D Zmorph.

El primer paso fue probar que las nuevas piezas diseñadas se adaptaban correctamente al nuevo servomotor y encajaban entre ellas. El abductor, la palma y el dorsal encajaban perfectamente entre sí, pero se encontraron pequeños problemas de diseño que se exponen a continuación:

- Una esquina del dorsal choca ligeramente con el abductor, lo que impide a este su completa apertura. En esta primera versión TPMG90-1 se limó ligeramente esta esquina para evitar forzar el mecanismo.
- La pieza de la palma no encaja correctamente con el dorsal, no puede cerrar porque choca con los carretes de hilo encajados en los motores paso a paso. Esto resulta problemático, puesto que estos carretes necesitan girar con libertad para permitir el movimiento del dedo.
- Al montar la mano completa y, al ser Dextra una mano en la cual sus componentes están distribuidos de forma compacta, se detectó que el imán del encoder del dedo índice rozaba con el extremo mencionado en el punto anterior. Para evitar esto, se lijó ligeramente la parte superior del extremo.

Los tendones de los módulos de los dedos de la mano se simulaban con hilo de pescar de 6mm de diámetro. El interior de cada falange acoge al hilo en un conducto en forma de “S”, lo que permite que al tensionarse, la primera falange en flexionarse sea la más cercana al carrete que enrolla el hilo. De este modo, la mano se cierra de un modo similar al que lo haría la mano humana.

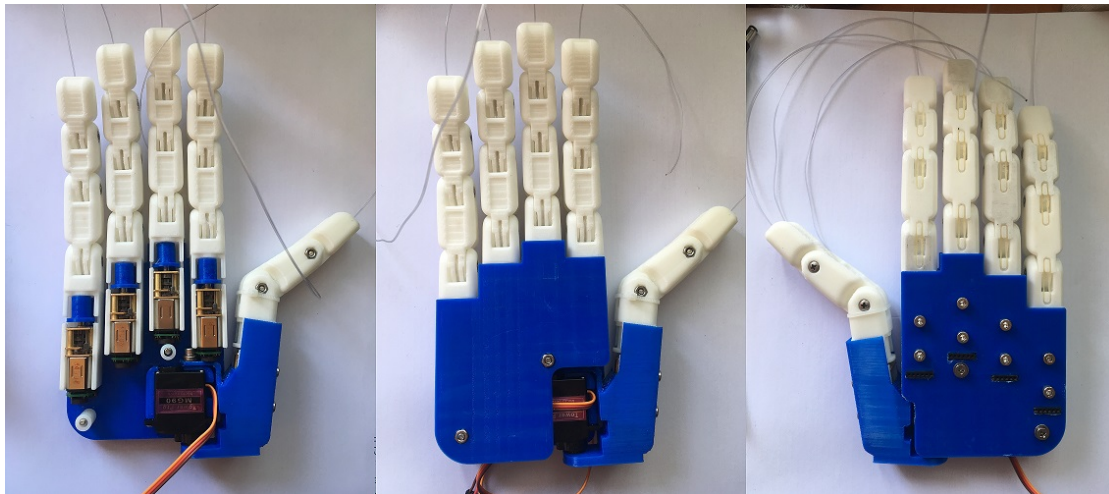


Figura 5.5: Ensamblaje completo. TPMG90-1 de frente con y sin dorsal, y de revés.

5.1.3. Mejoras para TPMG90-2

En base a las observaciones realizadas en esta sección, se proponen las siguientes mejoras mecánicas de cara a la próxima versión de la mano:

- Muñeca / Soporte de la mano para acoplarse a TEO.
- Modificar archivos CAD para evitar limar el dorsal.
- Crear nueva palma que no roce con los carretes de hilo de los motores.
- Seleccionar y añadir material antideslizante a los dedos.
- Rediseñar puntas para que el nudo del hilo de pescar quede escondido.
- Diseñar mano izquierda.

5.2. Electrónica

Los componentes electrónicos de la mano Dextra original se mantuvieron en su totalidad en la versión TPMG90-1, a excepción de la placa Teensy, de la cual se utilizó la versión 3.2. en lugar de la 3.1 utilizada para la mano original.

5.2.1. Teensy 3.2

La versión 3.2 de Teensy es una actualización menor a Teensy 3.1, totalmente compatible con todas las placas adicionales diseñados para Teensy 3.1. Conserva el mismo tamaño, pinout y procesador que Teensy 3.1. El principal cambio es un regulador mejorado de 3.3 V, que permite a la tarjeta alimentar directamente ESP8266 Wifi, WIZ820io (W5200) Ethernet y otros dispositivos de 3.3 V que consumen mucha energía⁴⁰.

Se especifica la potencia de salida de Teensy 3.2 a 250 mA y la entrada de voltaje máximo a 6 V, debido a los límites de disipación térmica de PCB. Sin embargo, el chip del regulador real es capaz de dar hasta 10 voltios de entrada y hasta 500 mA de salida. Estos permite que Teensy 3.2 sea más resistente cuando se utiliza con fuentes de alimentación que no son USB y que no son fuentes de 5 V bien reguladas.

5.2.2. Montaje del circuito

Se precisa la soldadura de pines macho-macho rectos de 2.54 mm tanto en la placa Teensy, como en los drivers, los motores y un extremo de los cables, que fueron fabricados a mano por la necesidad de usar pines de diferente paso a cada extremo (2.54 mm y 2.00 mm). Los pines de 2.00 mm acodados son los requeridos para los encoders. Por otra parte, los encoders se soldaron a los motores paso a paso, encajando su imán

⁴⁰PJRC, Teensy 3.2 and 3.1 - new features, 2013. [En línea] Disponible en: <https://www.pjrc.com/teensy/teensy31.html>. [Accedido: 19-01-2018]

en el eje extendido de los mismos (figura 5.6).

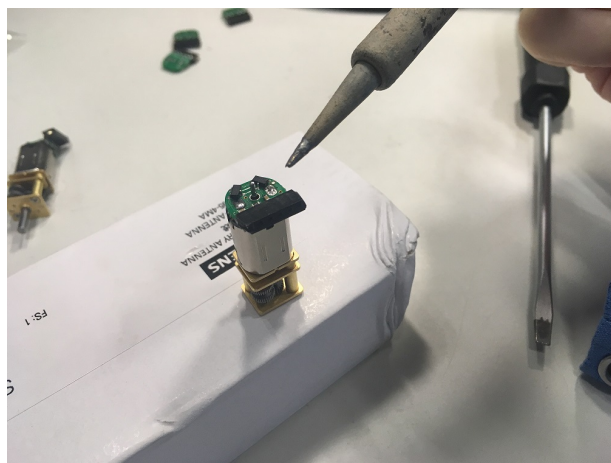


Figura 5.6: Soldadura de los encoders a los motores paso a paso.

El montaje del circuito electrónico parte de la tabla de control de la Dextra original (ver Apéndice B), eliminando algunos componentes adicionales. La electrónica de la Dextra TPMG90-1 no está integrada en la propia mano. Se utilizan dos placa de pruebas para realizar las primeras pruebas. Se puede observar el desarrollo de estas en el apartado 6.1 de este documento.

Se alimenta el circuito con una fuente de tensión. Para elegir los valores de las tensiones “Vbat” y “Vservo” adecuados, se ha de tener en cuenta que los componentes electrónicos tienen especificaciones distintas de consumo (ver tabla 5.2).

Tabla 5.2: Tabla de especificaciones de tensión de componentes electrónicos.

Componente electrónico	Mín. tensión de funcionamiento	Máx. tensión de funcionamiento	Tensión nominal
Motor Pololu 1000:1	-	-	6 V
Servomotor TowerPro MG90	-	-	6 V
Driver DRV8838	0 V	11 V	-
Encoder Pololu	2.7 V	18 V	-

Como se puede observar, las tensiones nominales de todos los motores es de 6 V, cifra que se encuentra entre los valores límites de tensión para los drivers y los encoders, por lo que se concluye que “Vbat” y “Vservo” pueden alimentarse de una misma fuente y que es recomendable que esta suministre una tensión de 6 V.

Conviene destacar que la medida de alimentar los motores paso a paso y el servomotor con una misma tensión parte de un principio de simplicidad y comodidad, partiendo de la base de que las tensiones de funcionamiento nos permiten este arreglo, pero es necesario aclarar que, dado que el servo no gira de forma ininterrumpida, sería conveniente alimentar los servos con fuentes independientes para evitar interferencias en los circuitos.

5.2.3. Mejoras para TPMG90-2

En base a las observaciones realizadas, se proponen las siguientes mejoras en la electrónica de cara a la próxima versión de la mano:

- Nuevos cables para los dedos, pues los actuales son demasiado rígidos y producen problemas de conexión.
- Placa de puntos, para no depender de tantos cables y de dos placa de pruebas.
- Integración electrónica, para incorporar la placa de puntos en la mano robótica.
- Alimentar el circuito directamente desde TEO, para evitar necesitar una fuente adicional.
- Comunicación con TEO mediante bus CAN.

5.3. Software

La aplicación de control elaborada por Álvaro Villoslada en Python se migra a C++ para utilizar YARP, y así poder adaptarnos a las necesidades que nos plantea querer implementar las manos en TEO. Las aplicaciones de YARP desarrolladas para el propósito de control de la mano se pueden encontrar en el repositorio de *yarp-devices* de RoboticsLab, en GitHub⁴¹.

5.3.1. Middleware YARP

YARP (Yet Another Robot Platform) es un conjunto de bibliotecas, protocolos y herramientas de código abierto, escrito en C++ para mantener los módulos y dispositivos limpiamente desacoplados e interconectar sensores, procesadores y actuadores en robots. La utilización de este software está aconsejado en particular para propósitos en

⁴¹RoboticsLab, DextraControlboard, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/yarp-devices/tree/issue-176-dextra/libraries/YarpPlugins/DextraControlboard>. [Accedido: 30-01-2018]

la robótica humanoide, que se encuentra con un gran número de componentes hardware para controlar y un software complejo. Dado que esto requiere una gran cantidad de cálculos, la forma más práctica de escribir, percibir y controlar simultáneamente en tiempo real.

Con la intención de que el software de TEO sea más estable y duradero, sin comprometer la posibilidad de cambiar sensores, actuadores, procesadores y redes, el equipo de Robotics Lab utiliza YARP para organizar la comunicación entre sensores, procesadores y actuadores, de modo que sea posible el acoplamiento flexible, haciendo que la evolución gradual del sistema sea mucho más fácil (ver figura 5.7). Este modelo de comunicación es neutro en cuanto al transporte, por lo que el flujo de datos se desacopla de los detalles de las redes subyacentes y los protocolos en uso (lo que permite usar varios simultáneamente, clave para una evolución sin problemas) [1].

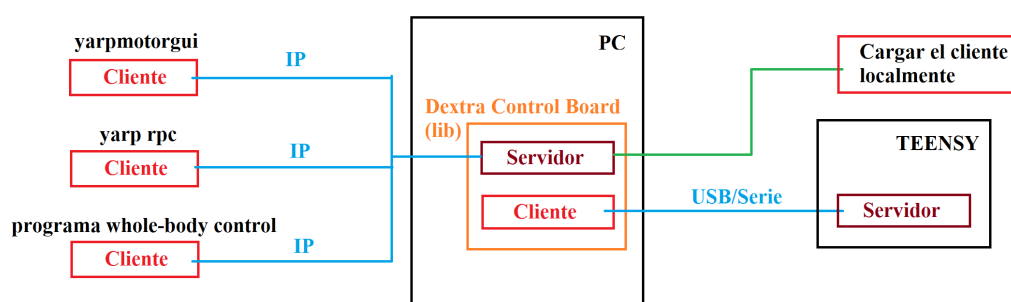


Figura 5.7: Esquema ejemplo funcionamiento YARP en TEO.

En la figura 5.8 se pueden observar los puertos YARP disponibles para las distintas articulaciones de TEO. Vemos como se dividen en puertos de manipulación, en los que se incluyen los dos brazos y el cuello (llamado cabeza en el esquema); y puertos de locomoción, donde encontraríamos los puertos relativos a las piernas y a la zona inferior del tronco del robot.

Tal y como se muestra a continuación, en el lado del PC que actúa de servidor, se carga el YARP device del dispositivo real, y simultáneamente se abren unos puertos. Se mapean “los comandos que entran por los puertos del servidor (los que emitió el cliente)” a “llamadas a las funciones del dispositivo real”⁴².

⁴² ASROB, Tutorial yarp devices, 2018. [En línea] Disponible en: http://asrob.uc3m.es/index.php/Tutorial_yarp_devices. [Accedido: 27-02-2018]

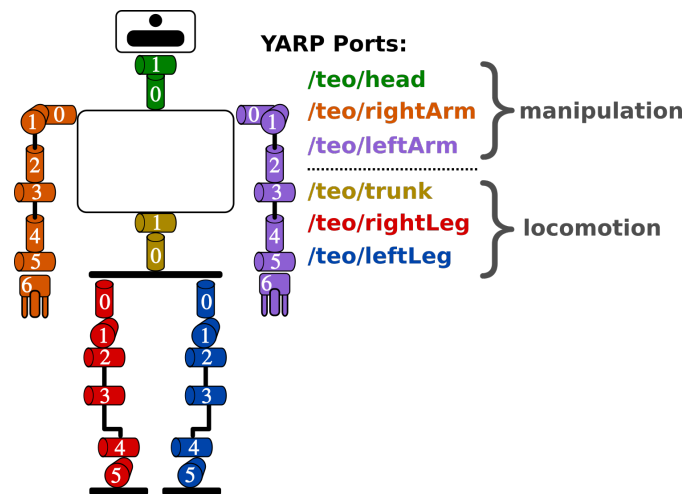


Figura 5.8: Puertos YARP en las articulaciones de TEO⁴³. ©RoboticsLab

■ Terminal 1:

```

1 cd ~/repos/yarp-devices/build %se cambia el directorio del shell al
  repositorio de yarp
  sudo make uninstall %se desinstala el repositorio con permisos de
  administrador
3 git pull %se incorporan los cambios de repositorio remoto a la rama
  actual
  make %se compila
5 sudo make install %se instala la ap. en el sistema
  yarp server -write %se establece la terminal de servidor yarp

```

■ Terminal 2:

```

1 ls /dev/ttyACM0 %ver contenido de los directorios de dispositivo
2 sudo chmod 777 /dev/ttyACM0 %permisos de lectura, escritura y
  lanzamiento
  yarpdev --device DextraControlboard --name /teo/dextra %crear
  dispositivo yarp

```

⁴³RoboticsLab, Appendix A: TEO Diagrams, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/teo-developer-manual/blob/master/appendix/a-teo-diagrams.md>. [Accedido: 27-02-2018]

■ Terminal 3:

```
1 yarp rpc /teo/dextra/rpc:i %puerto para Dextra
  yarpmotorgui —robot teo —parts "(dextra)" %GUI
3 set pos 0 20.0 %pos. motor (el 0x01 a 20.0, etc)
  set poss (20.0 20.0 20.0 20.0 20.0 20.0) %pos. 5 motores
```

■ Terminal extra (estado USB):

```
tail -f /var/log/syslog %el output de tail debe mostrar el nombre de
dispositivo generado
```

5.3.2. Mejoras para MGTP90-2

La única propuesta factible consiste en mejorar el programa de control a medida que se implementen mejoras que precisen de una actualización en la programación, por lo que el desarrollo del software queda supeditado a los avances que se realicen con el hardware.

Capítulo 6

Dextra TPMG90-2

En este capítulo se detallan las modificaciones y mejoras que convierten la Dextra TPMG90-1 en la Dextra TPMG90-2.

La principal diferencia entre ambas versiones es que la primera intenta mantener el mayor parecido posible con la Dextra original, modificando únicamente lo estrictamente necesario para su reproducción, mientras que la segunda, pretende ser un modelo mejorado, añadiendo todas las modificaciones necesarias concebidas para convertir a Dextra en una mano preparada para operar en TEO.

6.1. Mecánica

La pretensión de las siguientes modificaciones mecánicas es la de mejorar el diseño Dextra, teniendo en cuenta la optimización de su funcionamiento y el mantenimiento de la calidad de su ciclo de vida.

6.1.1. Nuevo dorsal

Se diseña el nuevo dorsal para que permita el movimiento del abductor del pulgar en toda su amplitud, modificando la esquina inferior derecha de la pieza.

Dado que el nuevo dorsal es equivalente al dorsal limado, se decide mantener la pieza actual en la mano derecha y utilizar este nuevo diseño para la mano izquierda. Esta nueva pieza, al igual que todas las demás, puede encontrarse en mi repositorio de GitHub⁴⁴.

⁴⁴J. J. Gago, Github profile: jgagom, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/jgagom>. [Accedido: 02-04-2018]

6.1.2. Muñeca y nueva palma

Para el diseño de la muñeca hay que tener en cuenta el terminal del brazo de TEO. Al final de su brazo, TEO tiene acoplado un sensor de fuerza JR3. La muñeca a diseñar debe encajar en el sensor de fuerza mediante los cuatro tornillos que se muestran en el plano de la figura 6.1⁴⁵.

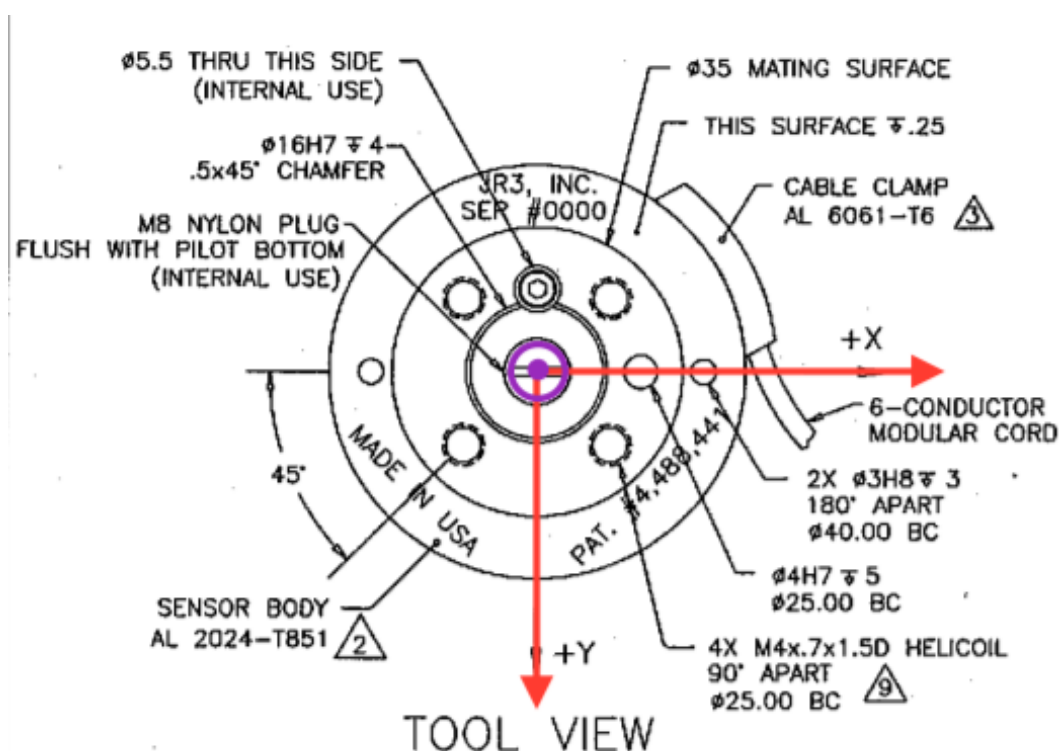


Figura 6.1: Esquema de la base exterior del sensor de fuerza de TEO, donde se acoplará la muñeca. ©RoboticsLab UC3M

El principal objetivo es diseñar una muñeca ligera y robusta, que encaje en el limitado espacio disponible de la Dextra TPMG90-2 y que sea capaz de sostenerla de manera estable.

Puesto que la nueva muñeca va a producirse mediante impresión 3D y se desea obtener una pieza de gran robustez sin necesidad de hacer uso de soportes, se diseña en dos partes que encajan entre sí. La primera (figura 6.2 derecha) se atornilla al sensor de fuerza, mientras que la segunda (figura 6.2 izquierda) se inserta en la primera y se acopla al dorsal y a la palma de la mano. Se aprovecha uno de los agujeros pasantes

⁴⁵UC3M, File:Jr3 50M31 corregido.pdf, 2016. [En línea] Disponible en: <http://robots.uc3m.es/index.php/File:Jr3-50M31-corregido.pdf>. [Accedido: 05-04-2018]

de la palma y del dorsal ya existente en Dextra TPMG90-1. Los demás agujeros y las dimensiones de las piezas exigen un rediseño de la palma.

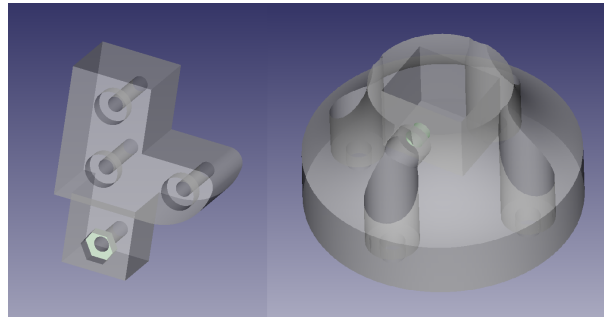


Figura 6.2: Diseño CAD de piezas de la muñeca.

La necesidad de modificar la palma parte del capítulo referente a Dextra TPMG90-1. El atornillado de la palma al dorsal no es factible debido a que esta pieza choca con los carretes de los motores paso a paso e impide un movimiento fluido de los cuatro dedos que se atornillan directamente al dorsal. Por otra parte, las exigencias espaciales de la nueva muñeca requieren nuevas modificaciones. Estas modificaciones incluyen la eliminación de las barreras inferiores, el aumento en dos milímetros de los bordes que deben coincidir con el dorsal y la adición de los agujeros correspondientes a las tuercas y tornillos necesarios para la segunda pieza de la muñeca (figura 6.3).

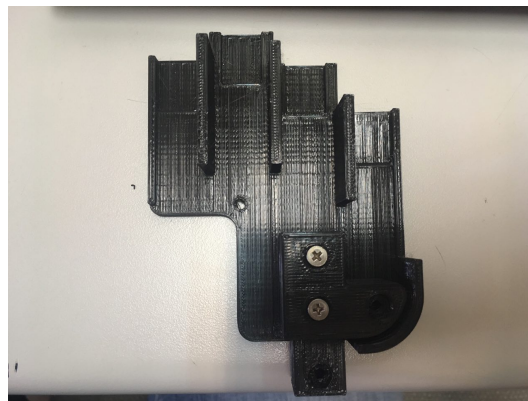


Figura 6.3: Palma de Dextra TPMG90-2 con pieza de muñeca.

Se prueba el conjunto completo en TEO para comprobar el buen encaje de las piezas. El resultado es satisfactorio y se puede observar en la figura 6.4. La mano se sostiene de forma firme al brazo de TEO, sin holguras y sin signos evidentes de esfuerzos cortantes o de flexión elevados.

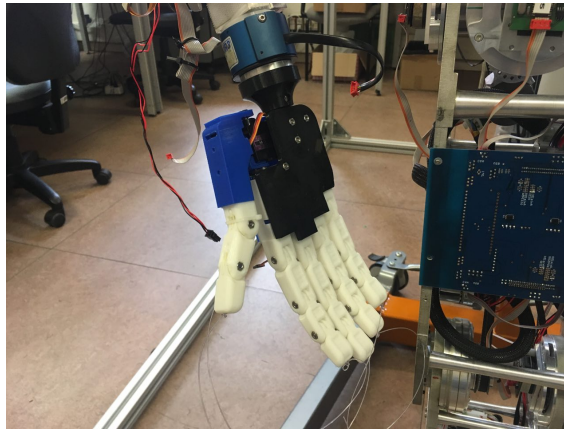


Figura 6.4: Prueba de muñeca y palma de Dextra TPMG90-2 en TEO.

6.1.3. Tercera falange y grip

Para que los extremos anudados de los tendones de la mano robótica no interfieran con los movimientos del robot, se modifica la falange distal modular (dedos 1-4) y la del dedo pulgar (dedo 5). Realizando un vaciado de 5 mm en el extremo del dedo, de radio igual a 2.5 veces el radio del vaciado que recorre el tendón, se consigue que el nudo final pueda quedar retraído en el propio dedo sin posibilidad de interponerse entre la mano y el objeto manipulado .

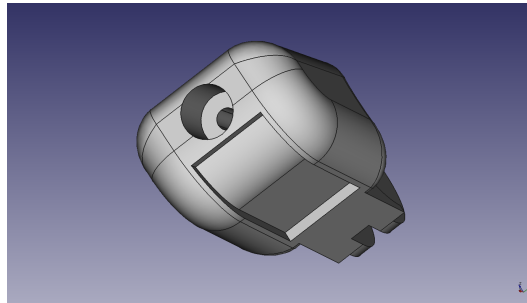


Figura 6.5: Nueva falange distal de Dextra TPMG90-2.

El grip en los dedos es fundamental por dos motivos principales. El primero es que se encargará de mejorar el agarre de objetos, permitiéndonos manipular objetos deslizantes, como un objeto mojado o una prenda de ropa delicada. El segundo, protegerá ligeramente a los objetos manipulados en el caso de aplicar una presión excesiva.

Los materiales propuestos en formato de lámina adhesiva son caucho negro de espesor 4 mm y fieltro marrón oscuro de espesor 2 mm. La lámina de caucho presenta numerosas ventajas con respecto a la segunda, como su patrón de relieve, que favorece-

ce su acción antideslizante y su capacidad de deformación elástica. Por otra parte, el grosor de 2 mm resulta insuficiente para el objetivo requerido, por lo que se utiliza la lámina de caucho y se dispone tal y como se muestra en la figura 6.6.



Figura 6.6: Dedos de Dextra TPMG90-2 con láminas antideslizantes de caucho.

6.1.4. Mano izquierda

Para la fabricación de la mano izquierda se tiene en cuenta que la mano es modular, que el servomotor se puede voltear y que todas las falanges guardan una relación de simetría respecto a su eje vertical. Por lo tanto, las únicas piezas que requieren un nuevo diseño para formar la nueva mano son la palma, el dorsal y la pieza de la muñeca que se atornilla entre las dos últimas. Estas tres nuevas piezas se exponen como un conjunto a continuación (figura 6.7).

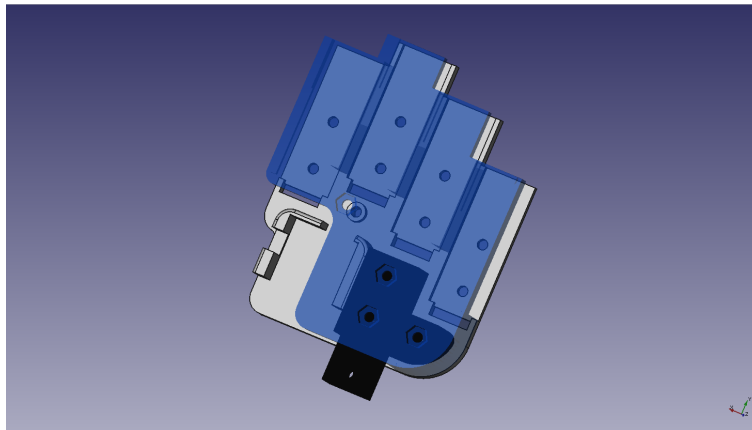


Figura 6.7: Mano izquierda Dextra TPMG90-2.

6.1.5. Estudio cinemático directo

Dado que son varias las piezas que se han modificado, respecto a Dextra original, es necesario presentar un análisis cinemático de la nueva mano. Los dedos “i”, “m”, “a” y “c” siguen siendo iguales entre sí y las modificaciones realizadas sobre ellos no interfieren en este estudio. Por lo tanto, los cambios a considerar son la posición del nuevo dedo “p” y la traslación, tanto de los ejes base de “p”, como de los ejes de *handRoot* (ahora *rightWrist*), debido a la incorporación la pieza de la muñeca.

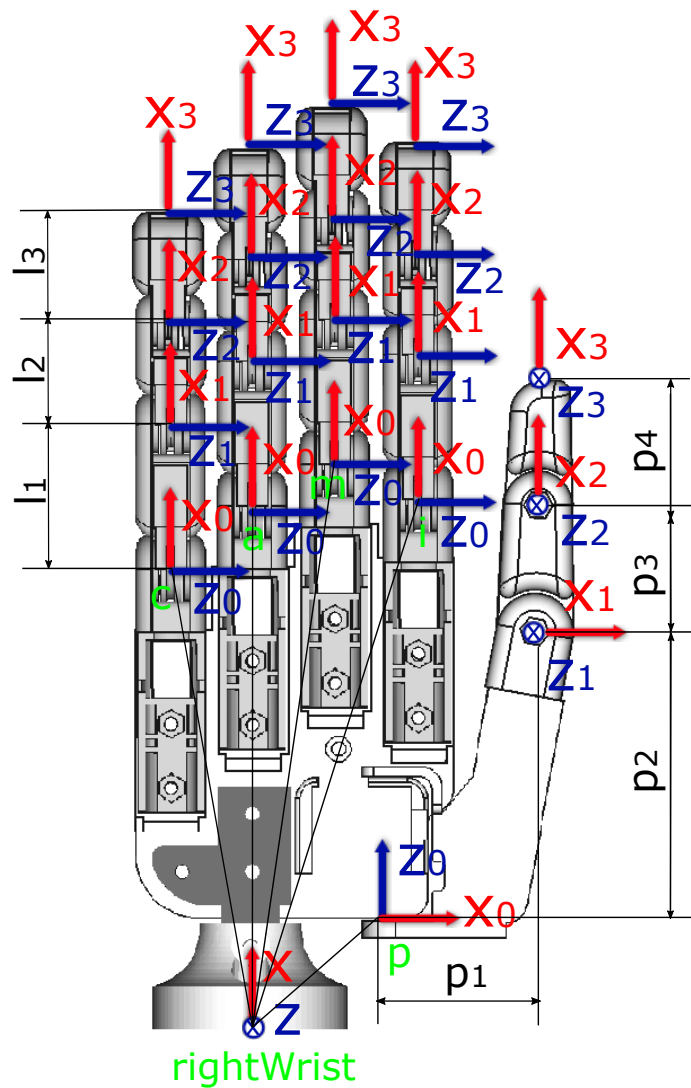


Figura 6.8: Sistemas de referencia de Dextra TPMG90-2.

Definida en la figura 6.8 la ubicación de los sistemas de coordenadas en cada uno de los dedos de la mano, se continúa con la presentación de los parámetros d_i y a_i del algoritmo de Denavit-Hartenberg para el dedo “p”. En la tabla 6.1, se exponen los nuevos valores de los parámetros de longitud. Las matrices y las ecuaciones planteadas para Dextra original, se mantienen iguales para este modelo.

Tabla 6.1: Parámetros de longitud de la figura 6.8 para Dextra TPMG90-2.

Longitud	Valor (mm)
p_1	34.10
p_2	69.29
p_3	29.65
p_4	29.41

En la tabla 6.2 se presentan las nuevas transformaciones de rotación y traslación necesarias para obtener las matrices de transformación homogéneas desde *rightWrist* hasta cada uno de los dedos.

Tabla 6.2: Tabla de transformaciones para Dextra TPMG90-2.

${}^{\text{rightWrist}}H_p$	$\text{Rot}_Z(90^\circ) * \text{Rot}_X(90^\circ) * \text{Tras}_X * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{px})$
${}^{\text{rightWrist}}H_i$	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{ix}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{iy})$
${}^{\text{rightWrist}}H_m$	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{mx}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{my})$
${}^{\text{rightWrist}}H_a$	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{ax}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{ay})$
${}^{\text{rightWrist}}H_c$	$\text{Rot}_X(-90^\circ) * \text{Tras}_X(\text{dist}_{cx}) * \text{Tras}_Y(\text{dist}_{cy})$

6.2. Hardware

Las novedades en hardware se traducen de igual modo en requerimientos indispensables para el correcto funcionamiento y comunicación de la mano con TEO.

6.2.1. Nuevos cables

Se sueldan nuevos cables para la mano (figura 6.9). Se decide utilizar hilo de grapinar para los pines correspondientes al dedo pulgar, puesto que, al oponerse, requiere de mayor libertad de movimiento. Para el resto de dedos se decide utilizar cables planos.

Como se puede observar, la cantidad de cables necesarios para conectar el circuito limita la movilidad de la mano y resulta aparatoso para realizar experimentos en TEO, por lo que resulta prioritario el proceder a la integración electrónica.

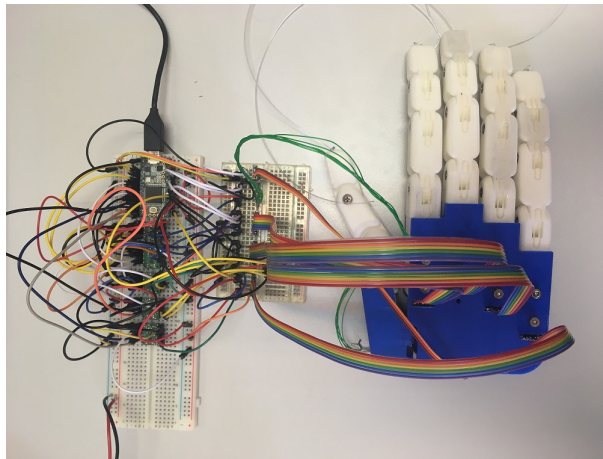


Figura 6.9: Nuevos cables para conectar los encoders de la mano al circuito.

6.2.2. Placa de puntos e integración electrónica

Aunque el objetivo a corto plazo es diseñar y encargar fabricar un circuito impreso, de cara a los experimentos con TEO se decide diseñar una placa de puntos provisional (ver figura 6.10) para, de este modo, facilitar los movimientos y reducir la cantidad de cables.

El circuito de la placa se diseña teniendo en cuenta los límites espaciales del dorsal de Dextra TPMG90-2. En este caso, puesto que Dextra dispone de espacio libre en el dorsal y es de esta parte de la que emergen los cables de los encoders, se decide colocar

la placa de puntos a doble altura sobre el esta pieza, aprovechando dos de los agujeros de los tornillos ya presentes en el diseño.

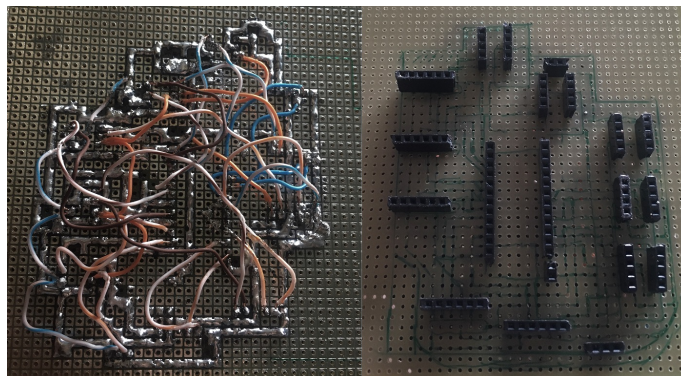


Figura 6.10: Soldadura del circuito para Dextra TPMG90-2.

La placa se recorta con una multiherramienta Dremel, a la que se acopla un disco de corte de 0.04". Para realizar los agujeros de la placa, se acopla un taladro de diámetro 3 mm a la Dremel. El resultado se puede observar en la figura 6.11.

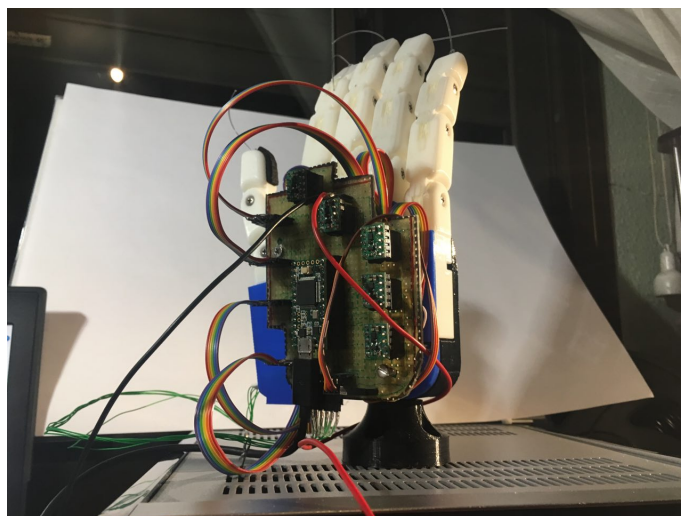


Figura 6.11: Electrónica completamente integrada en Dextra TPMG90-2.

El resultado final mantiene la estética compacta que caracteriza a Dextra. Ninguno de los cables o componentes de la placa interfieren con ninguno de los movimientos posibles de la mano. Por otra parte, los cables planos utilizados en la placa de pruebas resultan demasiado largos, lo que puede desencadenar en que estos queden enganchados con facilidad, por lo que sería deseable acortarlos.

6.2.3. Alimentación de actuadores

Se alimenta a TEO con una tensión de 42 V. Gracias a unos convertidores TRACO DC/DC, llegan 36 V a los brazos. Esta tensión es excesiva para las especificaciones de los componentes electrónicos de Dextra TPMG90-2, por lo que es necesario utilizar un nuevo convertidor para alimentar a la mano. En la tabla 6.3 se presenta una comparación entre los datos teóricos y experimentales de amperaje de los motores.

Tabla 6.3: Datos de consumo de los motores de Dextra TPMG90-2.

Condición	Módulo dedo (1-5)	Servo	Total (se asume 0.4A servo para casos vacíos)
VALOR TEÓRICO MÁXIMO			
Sin resistencia	0.7 A	0.4 A	3.9 A
Resistencia	1.6 A	-	8.4 A
CONSUMO REAL MÁXIMO A 5 VDC			
Sin resistencia	0.47 A	0.3 A	2.7 A
Resistencia	0.68 A	-	3.8 A
CONSUMO REAL MÁXIMO A 6 VDC			
Sin resistencia	0.52 A	0.3 A	2.9 A
Resistencia	0.70 A	-	3.9 A
CONSUMO REAL MÁXIMO A 7 VDC			
Sin resistencia	0.52 A	0.3 A	2.9 A
Resistencia	0.68 A	-	3.8 A

Los valores experimentales máximas que se presentan en la tabla 6.3 se han medido a tensiones de 5 V, 6 V y 7 V, dado que, aunque en la tabla 5.2 se definió que la tensión adecuada para alimentar los componentes es de 6 V, esta tensión podría sufrir variaciones. Para conseguir los valores máximos sin resistencia, se mueve individualmente cada dedo en los dos sentidos sin interrupción durante 30 segundos. Para conseguir los valores máximos con una resistencia considerable, se coloca la mano boca abajo en una superficie lisa horizontal y se mueve cada dedo individualmente, provocando que esta tenga que soportar su propio peso.

Se puede comprobar que los valores teóricos sin resistencia son similares a los obtenidos en las pruebas experimentales⁴⁶. La diferencia de resultados entre los valores teóricos máximos con resistencia y los valores experimentales se deben a que la resistencia no era agresiva con el mecanismo de flexión del dedo, para evitar la rotura, por lo que con una resistencia inmóvil, fácilmente podría doblarse el consumo.

⁴⁶Pololu, Micro Metal Gear Motors, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.pololu.com/file/0J1487/pololu-micro-metal-gearmotors.pdf>. [Accedido: 15-04-2018]

Puesto que la versión TPMG90-2 no cuenta con sensores de fuerza / presión, se toma como medida de prevención considerar el valor de consumo máximo medio entre los reales y teóricos, puesto que la posibilidad de encontrar una resistencia alta en operaciones cotidianas es viable, pero no hasta el punto del estancamiento del eje de salida de la caja de engranajes que pueda llegar a dañarla. Por lo tanto, para seleccionar un convertidor adecuado, se tendrá en cuenta el valor de amperaje en torno a 6 A, con valores de potencia ($P = V * I$) sobre 36 W.

Una de las opciones valoradas es utilizar, siguiendo la línea de los convertidores usados en TEO, un TRACO adecuado, que convierta los 36 V de entrada en un rango de 5-7 V y cuyo amperaje de salida se sitúe sobre a los 6.1 A. Se consulta una tabla comparativa de especificaciones de los productos de esta compañía disponibles en RoboticsLab⁴⁷, pero ningún producto se adapta a las necesidades de alimentación en concepto de amperaje (hasta 2 A) o potencia (1 - 9 W), cumpliendo las condiciones de entrada y salida de voltaje.

La solución deseada se encuentra en un producto de General Electric, el convertidor DC/DC KHHD006A0A41Z, en PCB con Aislamiento; una salida, 30 W, 5 V y 6 A; entrada entre 18 - 75 V (ver figura 6.12). Se ha de tener en consideración que, operando a 5 voltios, los 30 vatios de potencia son adecuados. Además, esta casuística está considerando el consumo máximo de los 5 dedos operando al mismo tiempo y encontrando una misma resistencia elevada, por lo que 30 W de potencia es un valor adecuado para el uso de esta mano robótica [85].

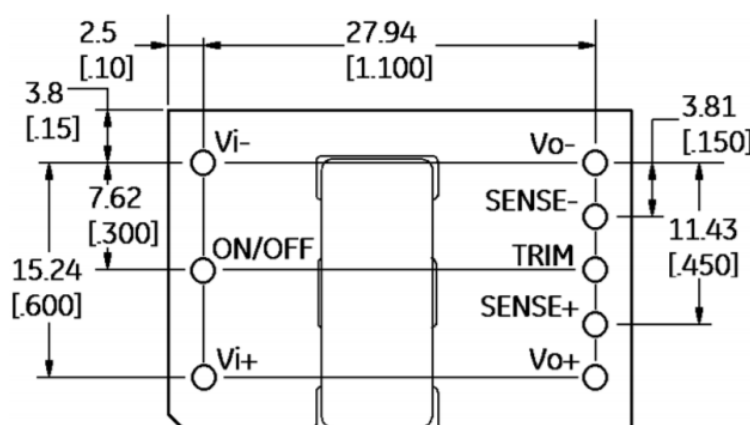


Figura 6.12: Entradas y salidas del convertidor DC/DC. [85]

⁴⁷TRACO POWER, DC/DC Converters, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.tracopower.com/products/browse-by-category/detail/dc-dc-converters/sip-package/>. [Accedido: 15-04-2018]

En el caso de que los 5 V de salida resulten insuficientes en algún punto concreto, se pueden utilizar los pines de salida tal y como se muestra en la figura 6.13, para aumentar el la tensión de salida. La combinación del ajuste de voltaje de salida y la tolerancia inicial de la tensión de salida no debe exceder el rango de compensación permisible del 80 % al 110 % de la tensión de salida nominal medida entre los terminales Vout+ y Vout-.

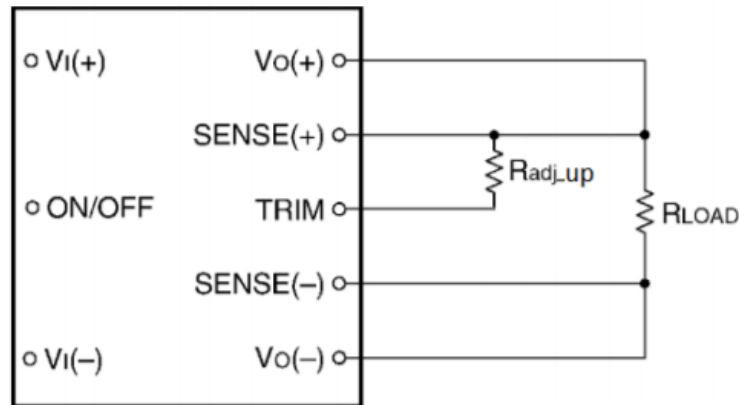


Figura 6.13: Configuración de circuito para aumentar el voltaje de salida. [85]

Dado que, utilizando la placa de pruebas de la figura 6.11, el espacio es limitado, se decide integrar el convertidor DC/DC en el futuro circuito impreso, por lo que todos los experimentos de esta mano, en esta memoria, se realizarán alimentando el circuito con una fuente de tensión por limitaciones de tiempo derivadas de fabricar la placa de circuito impreso.

6.2.4. *Controller Area Network (CAN) bus*

En la arquitectura de comunicaciones de TEO hay que diferenciar la existencia de dos microprocesadores principales; el de locomoción, encargado de enviar y recibir órdenes del tren inferior, para controlar la estabilidad; y el de manipulación, encargado de enviar y recibir órdenes al tren superior [86].

Para establecer las comunicaciones de los drivers de los motores componentes de las distintas partes de TEO con los microprocesadores se hace uso del protocolo de comunicación CAN, que proporciona una comunicación rápida entre microcontroladores en tiempo real de ejecución. Se utilizan, en concreto, cuatro buses CAN, dos para el sistema manipulador y dos para el sistema locomotor (ver figura 6.14), cada uno encargado del ala derecha o izquierda del humanoide.

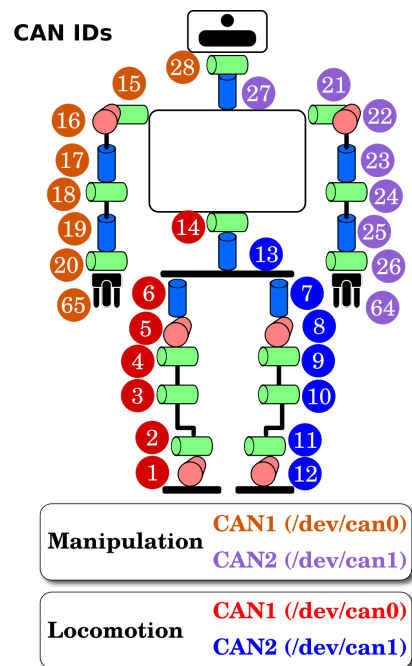


Figura 6.14: CAN IDs en TEO⁴⁸. ©RoboticsLab

El control del CAN bus 1 y 2 de manipulación se produce desde la placa mostrada en la figura 6.15. Los dos grupos de tres cables que salen de la tira de pines situada abajo a la izquierda corresponden, respectivamente a CANH, CANL y tierra. Estos cables terminan en un conector DB9 hembra, a través del cual se extiende la red CAN bus a lo largo de toda la extremidad correspondiente.

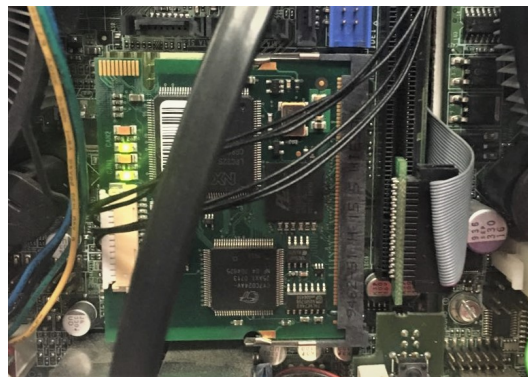


Figura 6.15: Placa de control de CAN bus de manipulación.

⁴⁸RoboticsLab, Appendix A: TEO Diagrams, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/teo-developer-manual/blob/master/appendix/a-teo-diagrams.md>. [Accedido: 15-04-2018]

Teensy 3.2 proporciona una interfaz CAN mediante sus pines TX y TR (3 y 4)⁴⁹, sin embargo es necesario un controlador de línea, es decir, un transceptor CAN. Se hace uso de la placa WaveShare SN65HVD230 (ver figura 6.16) y de la librería FlexCAN.

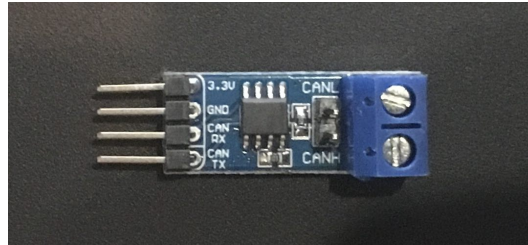


Figura 6.16: Transceptor CAN WaveShare SN65HVD230.

El transceptor elegido se alimenta a una tensión de 3.3 V, siendo este el voltage del pin de salida Vout de Teensy 3.2. Por otra parte, Teensy 3.2 se alimenta con 3.6 - 6 V, por lo que, si se pretende establecer el control mediante el middleware YARP, a través del CAN bus y prescindir de toda conexión y alimentación externa, será necesario alimentar a Teensy (que alimenta a toda la lógica del circuito) con el convertidor DC/DC, siendo esto completamente viable.

6.3. Software

A continuación se exponen los avances relacionados con el software de Dextra TPMG90-2.

6.3.1. Adaptación *plug-ins* YARP

Los avances en el software de Dextra TPMG90-2 tienen relación con la adición del transceptor CAN a su electrónica. En esta versión de la mano, es necesario adaptar los programas de control al nuevo protocolo de comunicación y hacer que el programa se plantee en modo sub-dispositivo, para que pueda utilizar el transceptor y, de este modo, se conecte al bus CAN1 de manipulación.

El código generado para esta implementación se puede consultar en el repositorio de *yarp-devices* de RoboticsLab⁵⁰.

⁴⁹PJRC, Welcome to Teensy 3.2, 2013. [En línea] Disponible en: https://www.pjrc.com/teensy/card7a_rev1.pdf. [Accedido: 16-04-2018]

⁵⁰RoboticsLab, DextraControlboard, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/yarp-devices/tree/issue-176-dextra/libraries/YarpPlugins/DextraControlboard>, 2018. [Accedido: 19-04-2018]

Capítulo 7

Pruebas, experimentos y resultados

En este capítulo se detallan las pruebas y experimentos llevados a cabo con las distintas versiones de la mano para comprobar su buen funcionamiento y efectividad.

7.1. Equipos utilizados

Para llevar a cabo los experimentos que se describen a continuación, se ha hecho uso de los siguientes equipos y herramientas.

- Fuente Alimentación FAC-662-B
- Multímetro digital
- Báscula electrónica SANDA SD-4434
- Calibre de Vernier simple 150 mm (Resolución: 0.025 mm)

7.2. Experimentos con Dextra TPMG90-1

La intención de los experimentos con la versión TPMG90-1 es comprobar el buen estado de las conexiones y el correcto funcionamiento de la mano.

7.2.1. Pruebas puesta a punto

Las pruebas de puesta a punto se ejecutan desde el momento en el que la mano está completamente ensamblada hasta que desarrolla un comportamiento correcto. Estos experimentos, nombrados por sus fechas de ejecución, se detallan a continuación.

1. **Marzo 15** - Se conecta el circuito completo de la mano y se alimenta con la fuente de tensión.
 - Problema: La mano no responde. Se comprueba que la placa de pruebas grande utilizada para este propósito está en mal estado.
 - Solución: Conectar un solo dedo en la placa de pruebas más pequeña para localizar el foco del problema.

2. **Marzo 16** - Se prueba el circuito de un solo dedo (índice).
 - Problema: El dedo se mueve pero no se comporta de un modo coherente con el firmware. Necesidad de anudar adecuadamente el hilo de pescar en la punta. La tensión de la fuente oscila demasiado.
 - Solución: Revisar la circuitería. Se detecta un par de cables intercambiados. Se anuda el hilo de pescar. Se consigue una nueva fuente.

3. **Marzo 19** - Se prueba el circuito de nuevo con el mismo dedo (índice).
 - Problema: Se revisa el firmware, el control de la mano no coincide con el diseño de la circuitería propuesto.
 - Solución: Utilizar un nuevo firmware de la rama “Develop” de GitHub y migrar, para evitar futuras complicaciones, el control de la mano de Python a C++ en un entorno YARP para establecer las comunicaciones necesarias con el humanoide TEO.

4. **Marzo 24** - Se inicia la programación en C++.
 - Problema: Se detecta que el primer programa está hecho en modo sub-dispositivo y depende de un dispositivo que depende del CAN bus.
 - Solución: Modificar el programa para que se pueda utilizar independientemente.

5. **Marzo 26** - Se introducen los cambios necesarios para poder mover todas las articulaciones. Mediante el “tail” se observa el comportamiento del dispositivo y se observa el nombre asignado a este en “/dev”, para que utilizarlo en el “chmod” y que se nos permita cambiar los permisos de acceso a sus directorios. El “chmod” es una propuesta promocional hasta la realización de unas “udev rules”.
 - Problema: El dedo no responde.
 - Mejora: Faltan líneas en el código para comandar todos los dedos a la vez.
 - Solución: Repasar las comunicaciones con el dispositivo de la mano y añadir líneas para poder operar todos los dedos simultáneamente.

6. **Marzo 27** - Se prueba el circuito con el mismo dedo y el firmware de la rama “Develop”.

- Problema: El comportamiento es correcto pero intermitente. Se sospecha de la doble tira de pines de los encoders de los motores paso a paso.
 - Solución: Desmontar los motores y quitar la segunda tira de pines que permitía conectar los cables de manera más superficial.
7. **Marzo 28** - Se desarrolla una interfaz gráfica de usuario (GUI) y se implementan las líneas necesarias para que se puedan comandar varios dedos a la vez.
- Problema: Mensaje de error de encoder. La GUI no se ejecuta.
 - Solución: Revisar de nuevo el firmware original para comprobar que las instrucciones sean correctas.
8. **Marzo 30** - Se conecta el circuito del índice, pulgar y abductor del pulgar. Se mueven correctamente con la interfaz de la rama “Develop”.
- Problema: Los cables que conectan los encoders a la placa de pruebas son demasiado rígidos y la conexión se interrumpe en ocasiones.
 - Solución: Soldar nuevos cables.
9. **Marzo 30** - Se conecta el circuito del índice, pulgar y abductor del pulgar. Se mueven correctamente con la interfaz de la rama “Develop”.
- Problema: Los cables que conectan los encoders a la placa de pruebas son demasiado rígidos y la conexión se interrumpe en ocasiones.
 - Solución: Soldar nuevos cables.
10. **Abril 01** - Se consigue una placa de pruebas de 830 pins, se prueban nuevos cables y se conecta el circuito completo de la mano. Dextra TPMG90-1 responde correctamente. Se terminan las pruebas de puesta a punto.

7.2.2. Pruebas funcionamiento

Las pruebas de funcionamiento se ejecutan cuando la mano ya está completamente operativa. En este punto, Dextra TPMG90-1 no puede utilizarse en TEO puesto que es necesario llevar a cabo los arreglos y mejoras mencionados en el capítulo correspondiente a la versión TPMG90-1. Para probar su correcto funcionamiento, se realizan las pruebas que se muestran a continuación. Los enlaces a los vídeos correspondientes pueden encontrarse en las referencias citadas.

Prueba básica de movilidad

Esta prueba consiste en mover consecutivamente los cinco dedos en todas sus direcciones para así detectar posibles problemas⁵¹. Se ejecuta este experimento en cinco ocasiones, hasta que se desarrolla con éxito. Los resultados de la prueba se muestran a continuación en la tabla 7.1. Se estima necesario un porcentaje elevado de movimientos desarrollados con éxito para proceder a desarrollar una versión posterior y comenzar los experimentos de agarre y con TEO.

Tabla 7.1: Resultados de la prueba básica de movilidad.

Dedo	P1	P2	P3	P4	P5	Acciones	OK (%)
Pulgar	Control de posición errático	OK	OK	OK	OK	P1 - Se detecta y cambia cable defetuoso	80
Índice	Bloqueo en extensión	Flexión insuficiente	OK	OK	OK	P1 - Se afloja el tornillo que une la falange media con la proximal. P2 - Se fija el carrete al motor con pegamento termofusible.	60
Corazón	OK	OK	OK	OK	OK	-	100
Anular	Flexión insuficiente	OK	OK	OK	OK	P1 - Se fija el carrete al motor con pegamento termofusible.	80
Meñique	OK	OK	OK	OK	OK	-	100
Total OK (%)							84

Uno de los fallos reiterantes fue que el carrete impreso en PLA que se encaja en el motor paso a paso de cada dedo para enrollar el hilo de pescar que actúa de tendón y permitir la flexión del dedo, se desgasta y deja de oponer resistencia al movimiento del motor, pasando a permitir que su eje deslice en su interior. Se decide, a modo de prevención, aplicar la medida de reforzar la unión con pegamento termofusible a los cinco dedos.

Teniendo en cuenta que el porcentaje de movimientos correctos en las cinco repeticiones de la prueba es mayor al 80 %, se considera adecuado diseñar y ejecutar las pruebas pertinentes para estudiar las capacidades de la mano.

⁵¹J. J. Gago, Dextra TPMG90-1: Test movilidad, 2018. [En línea] Disponible en: <https://youtu.be/YkxLTsBIyKo>. [Accedido: 02-05-2018]

Test básico nuevo agarre

Esta prueba consiste en agarrar un objeto de grosor reducido utilizando la nueva configuración de agarre que nos permite el rediseño del abductor y el dorsal de la versión TPMG90-1 (figura 7.1) para así probar su efectividad⁵².

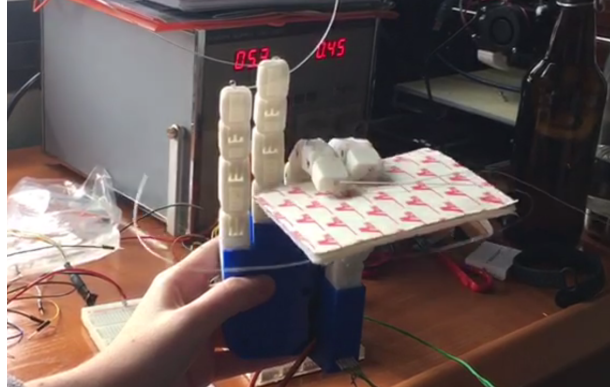


Figura 7.1: Dextra TPMG90-1 - Test agarre objeto fino.

La prueba se desarrolla sin problemas. Para este tipo de agarre hay que posicionar el dedo pulgar justo en el medio de los dedos índice y corazón, lo que es equivalente a posicionarlo al final del giro del servomotor. De otro modo, el objeto agarrado se gira y puede llegar a caerse o doblarse.

7.3. Experimentos con Dextra TPMG90-2

Con Dextra TPMIG90-2 se ejecutan los experimentos definitivos que prueban la funcionalidad de la mano. Todos ellos, se ejecuten o no con la mano atornillada y conectada a la muñeca de TEO, están destinados a poder reproducirse con la mano montada correctamente en el humanoide. Puesto que el adaptador de la muñeca diseñado para la mano permite la colocación de esta en cuatro posiciones, en intervalos de 90°, se ha de elegir la orientación de la mano de forma previa al inicio de estas pruebas para obtener unos resultados coherentes.

La figura 7.2 describe las dos posiciones que sirven como marco de referencia para la descripción y el análisis del movimiento. La diferencia entre ambas reside en la orientación de las palmas de las manos [87].

⁵²J. J. Gago, Dextra TPMG90-1: Test agarre, 2018. [En línea] Disponible en: [hTTps://youtu.be/dwkwfuedXgIk](https://youtu.be/dwkwfuedXgIk). [Accedido: 01-05-2018]

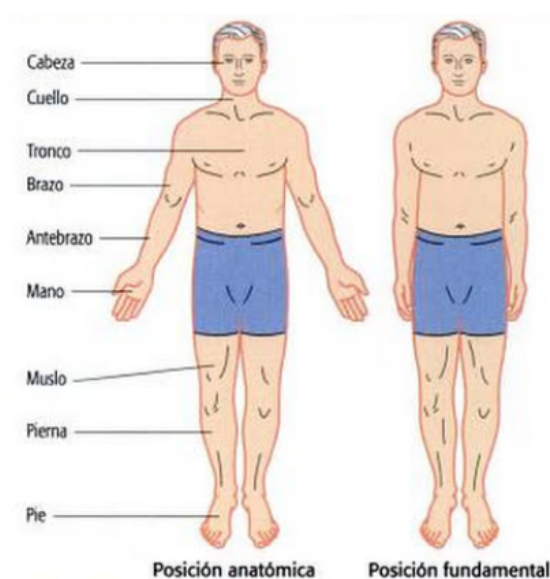


Figura 7.2: Posiciones de inicio para la descripción y análisis del movimiento. [87]

Aunque la posición anatómica es recomendable para el estudio del movimiento, la posición fundamental es la que más se asemeja a la posición de inicio de la mayoría de actividades cotidianas, por lo que se selecciona para los sucesivos estudios.

La figura 7.4, presentada para describir la relación entre la taxonomía de Cutkosky y la de Bullock, describe la posición final de la mano respecto al resto del brazo. Se otorga más importancia a la abducción / aducción de la muñeca que a la flexión / extensión, por lo que el eje de giro de la muñeca se establece perpendicular a la palma de la mano. Esta decisión se toma en base a un análisis de los movimientos que exigen las tareas asignadas a TEO, como planchar, pintar o saludar, que precisan de este giro por parte de la muñeca.

7.3.1. Taxonomía de agarre de Cutkosky

La taxonomía de Cutkosky que desarrolló Álvaro Villoslada con *Dextra original*, mostrada en el capítulo *Dextra original*, en la figura 4.4, describe que la mano robótica puede ejecutar 12 de los 16 agarres descritos en esta clasificación. A continuación, en la figura 7.3, se muestran los resultados de la prueba de reproducción de esta taxonomía en *Dextra TPMG90-2* para comprobar si se corresponde con el experimento desarrollado con anterioridad⁵³.

⁵³J. J. Gago, *Dextra TPMG90-2: Cutkosky taxonomy*, 2018. [En línea] Disponible en: <https://youtu.be/hOUNi9sMNxQ>. [Accedido: 06-05-2018]

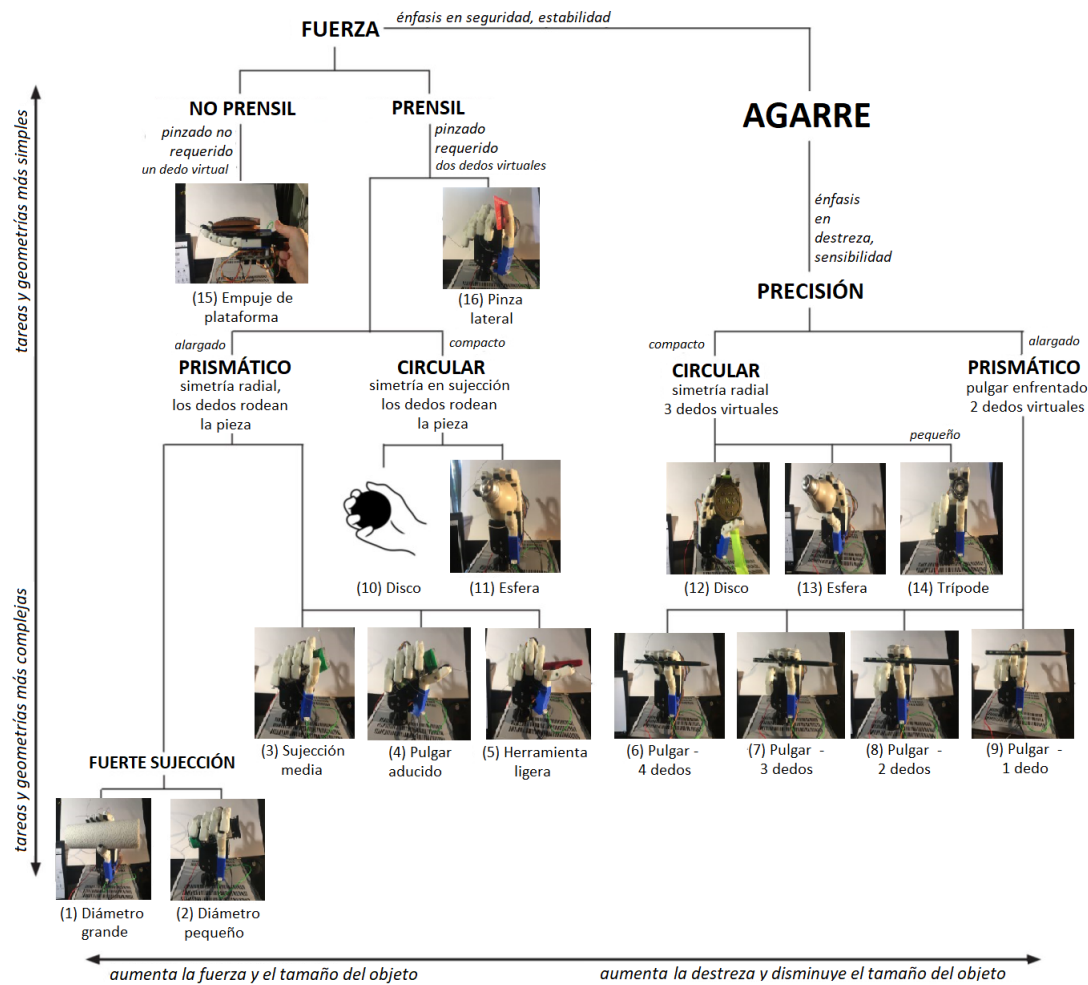


Figura 7.3: Dextra TPMG90-2 - Taxonomía de Cutkosky [20]

De acuerdo con lo mostrado en la figura 7.3, la mano puede realizar tres agarres más de los contemplados con anterioridad, que son tres agarres prismáticos, dos de ellos pertenecientes al grupo de agarres de fuerza, y el último perteneciente al agarre de precisión. La justificación de estos nuevos agarres se incluye en la tabla 7.2.

El único agarre que, de acuerdo con los experimentos de Á. Villoslada, no se puede reproducir, es el agarre circular de disco. Esto se debe a la configuración del pulgar de Dextra. Como se explicó en el capítulo de Estado del arte, la cinemática de Dextra contempla el giro del pulgar para su abducción, pero no el giro del pulgar sobre sí mismo, como es el caso de la mano Twendy-One. Esto se traduce en que el pulgar no es capaz de reposicionarse paralelo a la palma a la par que rota y, por lo tanto, impide este agarre.

Tabla 7.2: Agarres adicionales de Dextra TPMG90-2 - Taxonomía de Cutkosky.

Tipo de agarre		Descripción
Fuerza - Prensil - Prismático	Sujección media	Se consigue flexionando el dedo pulgar en una posición anterior a enfrentarse al dedo índice.
	Pulgar aducido	Se consigue extendiendo el dedo pulgar para posar la pieza, y realizando el agarre con los demás dedos.
Precisión - Prismático - Pulgar / 4 dedos		Se consigue situando en pulgar enfrentado entre índice y corazón y apoyando los dos dedos restantes.

Todos los agarres se evalúan siguiendo los criterios de la tabla 7.3. El criterio de presión permite conocer qué agarres precisan de aplicar una fuerza mayor para poder ejecutarse, y se evalúa ajustando la posición de los dedos a partir del contacto con la pieza. El criterio de resistencia a giro de 180°, permite identificar qué agarres son resistentes a giros bruscos del brazo, y se evalúa realizando giros rotacionales con la mano. El criterio de resistencia al impacto permite observar qué agarres se mantienen a pesar de recibir el efecto de una fuerza externa, y se evalúa lanzando una pelota de gomaespuma contra la mano.

Tabla 7.3: Evaluación de los agarres de la taxonomía de Cutkosky para TPMG90-2.

Tipo de agarre		Nº	Presión necesaria	Resistencia a giro 180°	Resistencia al impacto
Fuerza	No prensil	15	No aplica		
	Prensil	-	Media	Alta	Alta
		1	Baja	Alta	Media
		2	Media	Alta	Media
		3	Media	Alta	Alta
		4	Media	Media	Media
		5	Media	Media	Media
	Circular	10	Agarre no permitido		
		11	Baja	Alta	Alta
Precisión	Circular	12	Alta	Alta	Baja
		13	Media	Alta	Media
		14	Alta	Alta	Baja
	Prismático	6	Media	Alta	Media
		7	Media	Alta	Media
		8	Alta	Alta	Baja
		9	Alta	Media	Baja

Las pruebas de resistencia de la tabla 7.3 se ejecutan en tres ocasiones por agarre, por lo que cero o una respuesta favorables se considera resistencia baja, dos se consideran resistencia media y tres se consideran resistencia alta. Que la pieza modifique su posición en el agarre en cualquiera de estas pruebas de resistencia se considera un fallo. Respecto a la presión necesaria, agarres que no precisan de una mayor presión al entrar en contacto con la pieza se consideran agarres de presión baja; aquellos que necesiten un pequeño incremento de una a cinco posiciones en la interfaz de control, una vez establecido el contacto, son agarres de presión media; y los que precisan de un incremento de presión de más de cinco posiciones, una vez establecido el contacto, son agarres de presión alta.

Se puede observar que, como es esperable, la presión necesaria para el agarre es mayor en agarres de precisión, puesto que una menor cantidad de puntos de contacto significa una mayor necesidad de fuerza / presión para mantener el agarre firme. En cuanto a la resistencia al impacto, siguiendo el mismo razonamiento, es menor en aquellos agarres cuya superficie de contacto es menor; en este caso, los agarres de precisión. La resistencia al giro es aceptable en todos los agarres, no presentando ningún caso de respuesta baja.

7.3.2. Taxonomía de manipulación de Bullock

La taxonomía de Bullock tiene muchos puntos en común con la taxonomía de Cutkosky, más otorga importancia al movimiento que se realiza en relación al objeto, por lo que se han de considerar las articulaciones de TEO (figura 7.4).

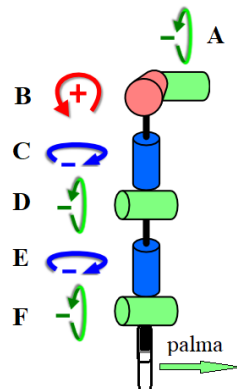


Figura 7.4: Coordenadas D-H del brazo derecho de TEO ⁵⁴. ©RoboticsLab.

⁵⁴RoboticsLab, Appendix A: TEO Diagrams, 2018. [En línea] Disponible en: <https://github.com/roboticslab-uc3m/teo-developer-manual/blob/master/appendix/a-teo-diagrams.md>. [Accedido: 18-04-2018]

En la tabla 7.4, se analiza la factibilidad de los tipos de manipulaciones propuestas por Bullock en su taxonomía principal. Para ello, se relaciona el número asignado en la taxonomía (ver figura 2.8) a aquellas figuras que precisen de agarre con los números asignados a los agarres estudiados en la prueba de la taxonomía de Cutkosky (ver figura 7.3). De igual modo, se especifica qué articulaciones son imprescindibles para realizar el movimiento, mediante letras que hacen referencia a la figura 7.4. Por último, se muestra el resultado de la prueba de factibilidad.

Tabla 7.4: Análisis y resultados, Taxonomía de Bullock con TPMG90-2.

Tipo de manipulación			Bullock	Relación con Cutkosky	Artic. necesaria	Factible OK/NO	
Sin contacto		Sin mov.		1	-	-	OK
		Con mov.	No en mano	2	-	F	OK
			En mano	3	-	-	OK
Con contacto	No prensil	Sin mov.		4	15	-	OK
				5	15*	A, D	OK
		Con mov.	No en mano	8	-	A, D	OK
				9	-	A, D	OK
			En mano	12	-	F	OK
				13	-	A, D	OK
	Prensil	Sin mov.		6	3	-	OK
				7	3*	A, D	OK
		Con mov.	No en mano	10	2*	E	OK
				11	3*	-	OK
			En mano	14	-	-	NO
				15	-	-	NO

Los únicos dos tipos de agarre no factibles son los incluidos en la manipulación con contacto, prensil, con movimiento en mano, relativos a la escritura o a la modificación de objetos en la propia mano. Este es el tipo de manipulación más compleja que realizan las manos humanas, por lo que tienen su propia taxonomía, que clasifica la manipulación según sus ejes de rotación / traslación.

En la figura 7.5 se puede observar como Dextra TPMG90-2 es capaz de desarrollar tan solo dos movimientos de traslación de los 11 movimientos propuestos⁵⁵. Esto se debe, principalmente, a que la mano no cuenta con movimientos de abducción / aducción en los dedos distintos al pulgar y a que las falanges no pueden moverse individualmen-

⁵⁵J. J. Gago, Dextra TPMG90-2: Within hand prehensile manipulation test, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=tN9dBP8Jy3s>. [Accedido: 26-05-2018]

te, debido a la subactuación, por lo que movimientos tan precisos no son posibles en la versión actual.

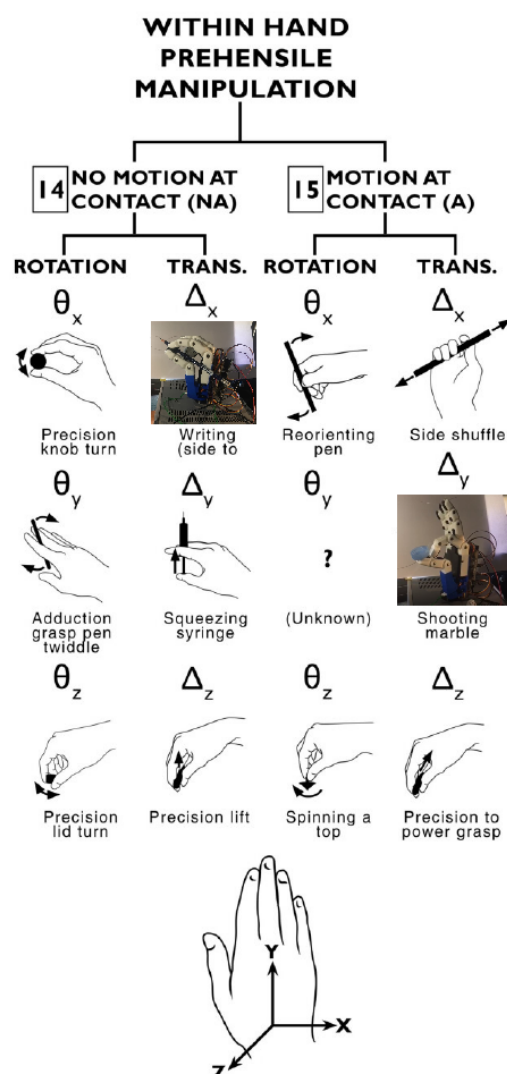
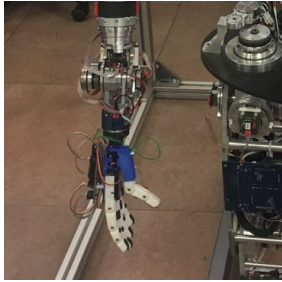
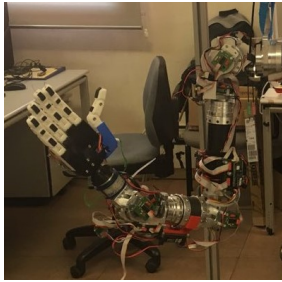
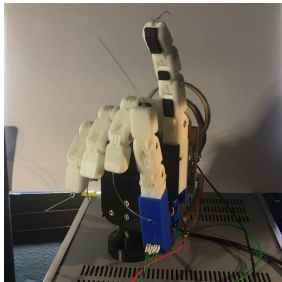


Figura 7.5: Taxonomía prensil en mano de Bullock. [7]

Las manipulaciones sin contacto con movimiento mostrados en la tabla 7.4 son una peculiaridad de esta taxonomía, puesto que, tanto la manipulación 2 como la 3 hacen referencia a acciones de comunicación que desarrollamos con nuestras manos y que podrían ser de gran utilidad para TEO, orientando este añadido a su función social. En especial, la manipulación número 3, referente a la señalización, puede convertirse en

una herramienta muy poderosa para el humanoide en concepto de accesibilidad. En la tabla 7.5 se reúnen los movimientos sin contacto de la taxonomía de manipulación general de Bullock.

Tabla 7.5: Tipos de manipulación sin contacto según la taxonomía de Bullock.

Tipo de manipulación		Bullock	Foto	Funcionalidad
Sin contacto	Sin movimiento	1		Estado de reposo
	Con movimiento	2		Saludo informal
		3		Comunicación gestual. Señalización. Lenguaje de signos

7.3.3. Pruebas de ejecución en TEO

Las pruebas que se muestran a continuación tienen como finalidad la comprobación de la adaptabilidad de la mano TPMG90-2 a las tareas asignadas a TEO, por lo que todas ellas se realizan con la mano montada en el humanoide.

Textiles

Las dificultades a superar en relación a las funciones de TEO con textiles giraban en torno al correcto agarre de la plancha y la precisa manipulación de telas ejecutando agarre en punta o trípode.

Como se puede observar en la figura 7.6, el reto inicial de sujetar con firmeza la plancha sin necesidad de contar con el agarre de adaptación se supera sin dificultad. Para la realización de esta tarea, se utiliza una alteración de un agarre de fuerza aplicado a un diámetro diámetro (agarre 2 de la taxonomía de Cutkosky), por lo que en este caso, es el dedo índice el que rodea al dedo pulgar, y no al revés, reforzando la postura.

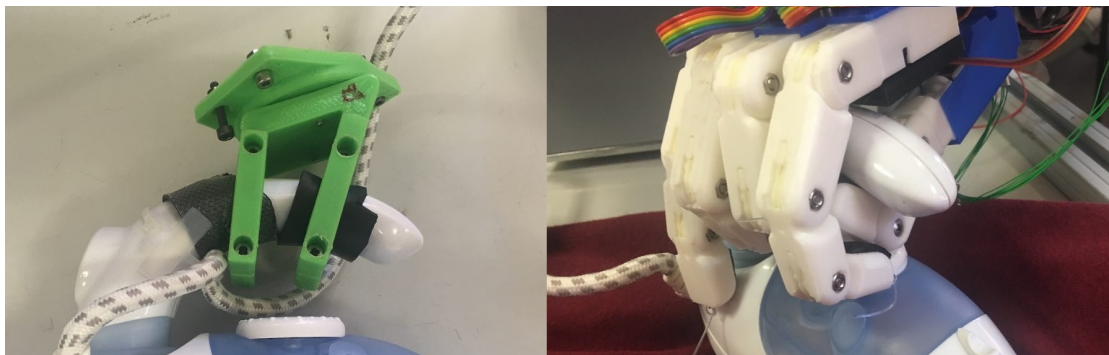


Figura 7.6: Pieza de adaptación (izqda.) y agarre de TPMG90-2 para plancha (izqda.).

La plancha que suele utilizarse con el robot es de un tamaño reducido, pues se trata de una plancha de viaje, por lo que no supone un problema para la mano soportar el peso de la herramienta. El principal inconveniente del tamaño de la plancha se encuentra en que los agarres deben realizarse de forma muy precisa, pues el espacio disponible para los dedos es limitado. Por lo tanto, es esperable que los resultados mejoren con una plancha convencional.

En lo relativo al agarre de prendas de ropa, se ha demostrado en la taxonomía de Cutkosky que la mano robótica es capaz de realizar agarres de objetos muy finos, como una tarjeta y ejecutar correctamente agarres de fuerza y precisión, por lo que las pruebas de manipulación de telas son superadas correctamente. En la figura 7.7 se puede observar como TEO levanta la manga de una sudadera. El agarre de telas se puede realizar con los dos tipos de agarre mencionados al inicio del capítulo, mas se obtienen agarres de mayor precisión con el agarre en punta.

En la tabla 7.6 se exponen los resultados de sujetar distintos tipos de ropa localizando los bordes de la misma y realizando el agarre desde los mismos bordes. Se decide aplicar esta restricción puesto que el proceso de doblado se realiza, usualmente, su-

Como se puede observar en la tabla, los agarres más sencillos y que producen un nulo margen de error son aquellos que se realizan con prendas de ropa gruesas, como la sudadera o la bufanda trenzada. El agarre de la camisa de seda sintética produce malos resultados, puesto que no siempre es sencillo que los dedos logren levantar la tela de la mesa y el éxito de la prueba depende, entonces, de la posición de la tela respecto a la mesa y el espaciado entre estas.

El agarre en punta resulta más eficaz, a pesar de usar un menor número de dedos, dado que el agarre con tres dedos resulta más escurridizo para las telas más finas debido al espacio que dejan los dedos índice y corazón entre sí, suficiente para sacrificar la precisión necesaria para manipular algunos tipos de telas.

Durante la prueba de manipulación de la sudadera, se reparó en la necesidad de algunas prendas de ropa de ser abrochadas o desabrochadas con cremallera para proceder a su planchado, o para doblarlas. Por ello se realizó una prueba de manipulación de cremallera (ver figura 7.8). Los resultados de esta prueba no resultaron concluyentes, fallando en más de un 50 %, pues para lograr el agarre deseado se necesita de una orientación muy precisa de las articulaciones del brazo, que permitan a la mano posicionarse paralela al mecanismo con la inclinación adecuada, para ejercer la fuerza necesaria sin que el tirador se escurra. Sería necesario utilizar un material menos esponjoso en las puntas de los dedos para disminuir el margen de error de esta acción.



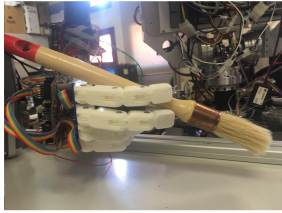
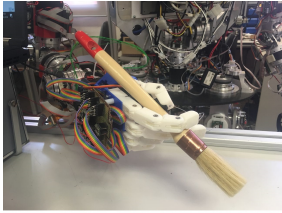
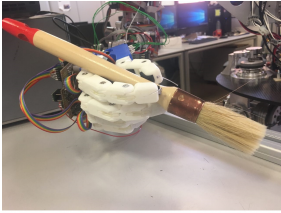
Figura 7.8: Desarrollo de acción compleja: manipulación de cremallera.

Pintor

La tarea de TEO como pintor exige la manipulación de una brocha como la que se muestra en las figuras de la tabla 7.7. En esta misma tabla se puede encontrar tres tipos de configuraciones viables para agarrar el pincel. La evaluación de su eficacia se realiza en base a la facilidad del agarre, es decir, de lo sencillo que resulta ejecutar la configuración con los dedos; y de la firmeza de la sujeción, es decir, de cómo responde la mano a fuerzas externas o movimientos bruscos.

La prueba de facilidad de agarre es una valoración de la cantidad de movimientos y de la necesidad de forzar las posiciones naturales de los dedos para el agarre. La facilidad se evalúa como buena si estos dos criterios resultan positivos; media, si alguno de los dos criterios resulta negativo; y mala, si no cumple las expectativas de ninguno de los dos. La prueba de estabilidad se realiza tirando levemente del pincel hacia arriba y moviendo el brazo de TEO y se evalúa en base a si el pincel se mantiene inmóvil (buena sujeción), si el pincel tiembla (sujeción media) o si el pincel modifica su posición (mala sujeción).

Tabla 7.7: Distintas configuraciones de pincel.

Info.	Agarre 1	Agarre 2	Agarre 3
Vista general			
Conf. del agarre	Índice y corazón enfrentados al pulgar. Agarre tipo trípode con puntas.	Pincel apoyado entre falange media de dedos corazón e índice, pulgar enfrente.	Pincel apoyado en falange distal de dedo corazón. Agarre punta entre índice y pulgar.
Facilidad del agarre	Media	Mala	Buena
Estabilidad del agarre	Media	Buena	Buena

Se comprueba que el mejor agarre es aquel que permite posar el peso del pincel en el dedo corazón y establecer el agarre entre los dedos índice y pulgar; siendo este, al mismo tiempo, el agarre más similar al que realizamos los seres humanos en la escritura.

Camarero

Puesto que la capacidad de TEO de agarrar y manipular distintos tipos de objetos ya ha sido probada con anterioridad, la prueba de agarre de objetos en la bandeja circular incorporada en el brazo izquierdo no supone ningún aporte adicional a la investigación. Por lo tanto, se procede a probar el agarre de la bandeja de dos asas, que resultaba problemática para las anteriores manos de TEO debido a la dificultad que supone realizar un agarre firme con ella, por la disposición de sus asas.

En primer lugar, se prueba el agarre con gomaespuma adaptado a las manos Fetch-Hand. Como puede comprobarse en la figura 7.9, este agarre es similar a un agarre cilíndrico, por lo que se ejecuta a la perfección y se logra una alta estabilidad.

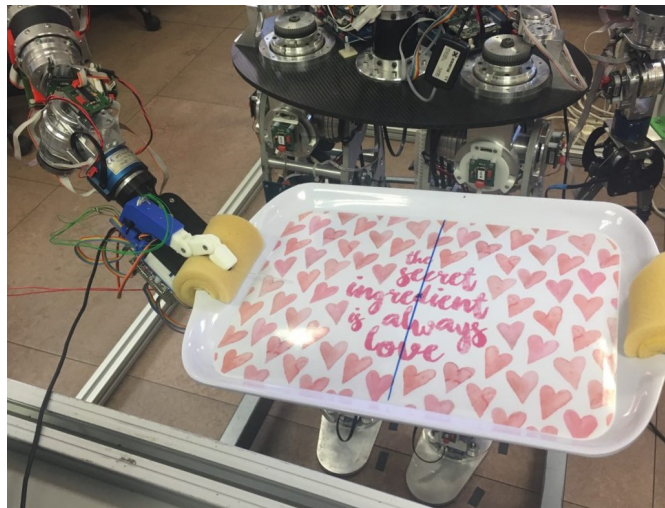
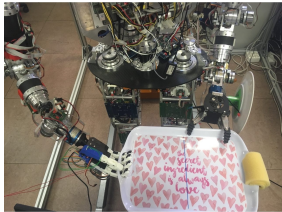
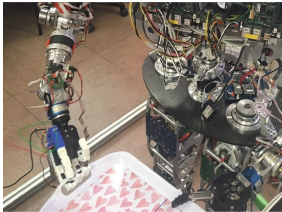
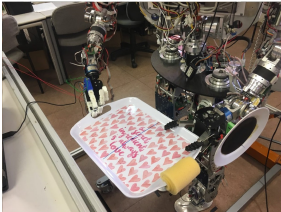
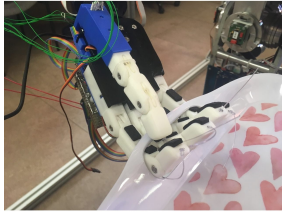
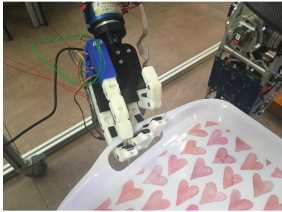
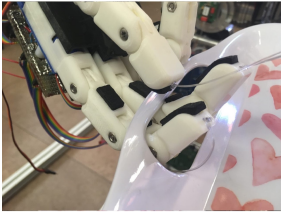


Figura 7.9: Agarre de bandeja con gomaespuma.

A continuación se prueba el agarre de la bandeja sin gomaespuma. La tabla 7.8 nos muestra los resultados de los tres tipos de agarre probados. El agarre con un dedo y pulgar no se pone a prueba puesto que resulta contraproducente en materia de soporte de peso y estabilidad.

Las pruebas de facilidad y estabilidad de agarre siguen el mismo criterio que las de las pruebas de agarre del pincel. En este caso, se evalúa como facilidad de agarre el hecho de que los dedos puedan entrar por la rendija entre el asa y la bandeja sin la necesidad de efectuar demasiadas maniobras por parte del programa de control. La estabilidad se mide comprobando la holgura de movimiento de la bandeja tras el agarre y se considera positiva cuando se mantiene inmóvil a pesar de aplicar una fuerza sobre uno de los lados de la bandeja para intentar desequilibrarla; media, si la bandeja se mueve ligeramente; o mala, si la bandeja modifica su posición de forma drástica.

Tabla 7.8: Distintas configuraciones de agarre de bandeja sin gomaespuma.

Info.	Cuatro dedos + pulgar	Tres dedos + pulgar	Dos dedos + pulgar
Vista general			
Vista detalle			
Facilidad del agarre	Mala	Media	Buena
Estabilidad del agarre	Buena	Buena	Media

El agarre con cuatro dedos y pulgar debe realizarse desde una posición concreta (muñeca enfrentada a la entrada) para que puedan pasar todos los dedos sin problema. Por el contrario, el agarre de dos dedos y pulgar permite un rango de posiciones de entrada mucho mayor, permitiendo acercamientos oblicuos. En cuanto a la estabilidad, como es esperable, resulta más sencillo modificar la orientación de la bandeja en la sujeción con menos dedos, puesto que la resistencia al movimiento es menor.

El agarre más positivo dependerá del peso y la altura de los objetos depositados en la bandeja. Se recomienda el agarre de dos dedos y pulgar para portar objetos bajos y pesados, o con el centro de gravedad cercano a la base de apoyo. Para objetos más inestables, como podría ser una copa de cristal, se debería optar por el agarre de tres dedos y pulgar. El uso del agarre con todos los dedos está desaconsejado, pues podría resultar en la caída de la bandeja al fracasar la aproximación a la misma para su elevación.

Función social

La función social de TEO, como se explica en el capítulo *Introducción*, responde a una necesidad de relacionarse con su entorno e identificar estímulos de exterior para así poder establecer una comunicación que resulte de utilidad en su contexto de robot encargado del hogar.

Los programas asociados a TEO con esta función consisten en el reconocimiento facial para reproducir un saludo. Este saludo, hasta el momento, consistía en agitar el brazo. A partir de ahora, este saludo puede resultar más antropomórfico, orientando la palma de la mano robótica hacia el individuo detectado y realizando también un movimiento de muñeca como el que plantea la manipulación número 2 de la taxonomía general de Bullock. Además, TEO puede adaptarse a un tipo de saludo más formal, contextualizado en un primer reconocimiento facial, ofreciendo un estrechamiento de manos, como el que se muestra en la derecha de la figura 7.10.

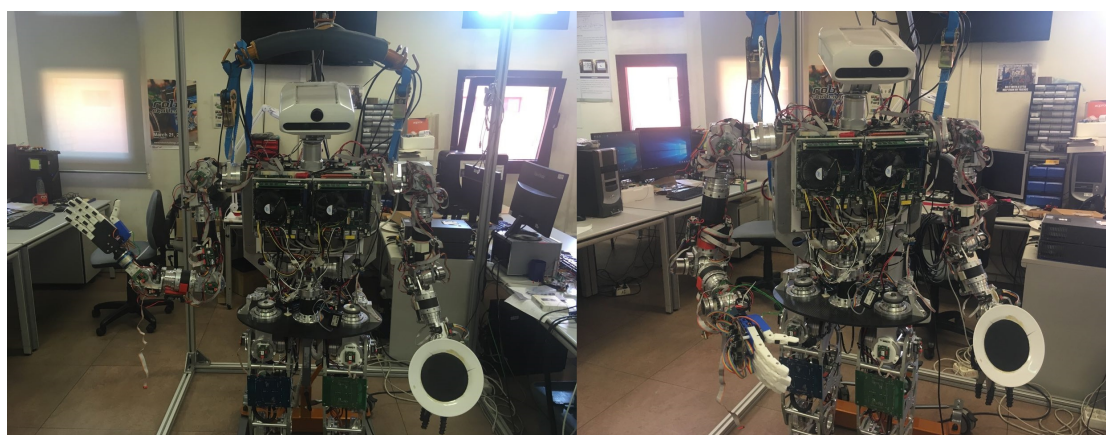


Figura 7.10: Saludo informal (izqda.) y formal (dcha.) de TEO con TPMG90-2.

7.3.4. Prueba antropomorfismo

A continuación se muestra un estudio de las similitudes de la última versión desarrollada en este proyecto con las magnitudes medias de la mano humana, para poder medir su antropomorfismo de un modo experimental. La tabla 7.9 muestra un resumen de los resultados. Los estudios que requieren de un desarrollo o explicación, se amplían en las siguientes páginas.

Tabla 7.9: Comparación de mano humana con Dextra TPMG90-2. [8][13]

Característica	Mano humana	Dextra TPMG90-2
GDL	21-22	15
Tipos de agarre	Agarre de fuerza y agarre de precisión	Agarre de fuerza y agarre de precisión a baja carga
Fuerza de agarre	>500 N (edad 20–25)	Fuerza distal >13 N Fuerza carga >1000 N
Fuerza de dos dedos	>100 N	<5 N
Velocidad articulación	120 °/s	72.47 °/s
Rango de flexión	100 ° (depende de la articulación)	74.03 ° (depende de la articulación)
Número de sensores	Sobre 17000	5
Percepción propioceptiva	Posición, movimiento y fuerza	Posición y movimiento
Percepción exteroceptiva	Presión, fuerza, aceleración, temperatura, dolor	-
Percepción proporcional	Habilidad de regular fuerza y velocidad	-
Control y destreza Estabilidad	Agarre estable contra cargas externas y/o deslizamientos	Agarre estable contra deslizamientos y bastante estable contra cargas externas
Volumen total aproximado	375.65 cm ³ (mano solo) [88]	210.02 cm ³ (aproximado sin electrónica)
Peso total aproximado	409.6 g (sin músculos extrínsecos)	326 g (electrónica y muñeca integradas)
Longitud mano	182.94 mm	192.36 mm
Anchura palma	85.29 mm	74.65 mm
Longitud índice	72.00 mm	77.97 mm
Anchura proximal índice	19.88 mm	17.00 mm
Anchura distal índice	17.29 mm	17.00 mm

Volumen

Dado que las formas de los componentes de la mano distan de ser regulares, el cálculo del volumen de la mano resulta un proceso complejo. Medir el volumen mediante el principio de Arquímedes no se plantea, dado que esta posee componentes electrónicos no resistentes al agua y numerosos orificios por los que pasan los tendones en los que el agua podría quedarse atascada.

La solución se presenta en una de las páginas de documentación de FreeCAD⁵⁶, en los que se muestra el modo de obtener el valor del volumen de las piezas modeladas en 3D mediante el comando `App.ActiveDocument.getObject("Nombre").Shape.Volume`, ejecutado en la consola de Python del programa, siendo "Nombre" la etiqueta de la pieza a medir (ver figura 7.11).

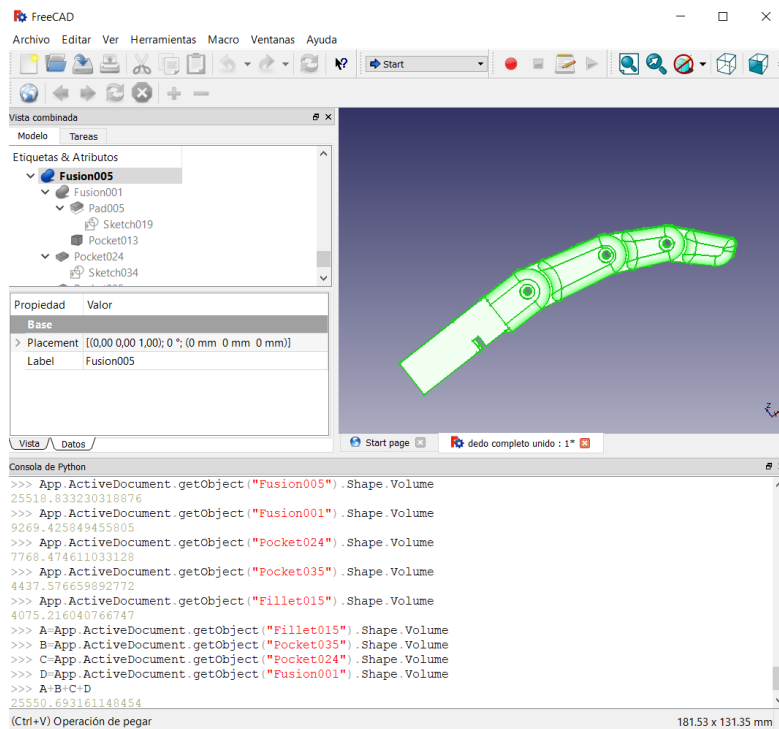


Figura 7.11: Obtención de volúmenes mediante FreeCAD.

Como se puede comprobar en las instrucciones ejecutadas en la consola de Python, el resultado no es el mismo si se miden las piezas por separado que si se miden unidas, puesto que el cálculo se realiza sobre el volumen total ocupado y no se suman los valores individuales para conseguir este valor. Así vemos como el dedo completo tiene

⁵⁶FreeCAD, Expresiones, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.freecadweb.org/wiki/Expressions>. [Accedido: 26-04-2018]

un volumen aproximado de 25.52 cm^3 , mientras que la suma de los volúmenes individuales suman un total de 25.55 cm^3 . El volumen total de la mano Dextra, incluyendo el adaptador a la muñeca y sin incluir la electrónica externa, suma 210.02 cm^3 .

Fuerza

La fuerza de dos dedos se mide presionando el dedo índice contra el dedo pulgar, sobre la báscula calibrada a cero. Se dispone de una báscula como la que se presenta en la figura 7.12, por lo que la medición de la fuerza de la mano será una aproximación a la fuerza real. Esta muestra una cifra de 438 g, lo que nos ofrece aproximadamente 4.3 N, utilizando, como única aceleración, la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2), dado que en todas las estimaciones de fuerza que se presentan en este apartado, la carga se aplica muy lentamente (carga cuasi-estática) y, por lo tanto, la fuerza de inercia es muy pequeña y se puede ignorar.

Lo que en la tabla 7.9 se denomina como fuerza de agarre, hace referencia a la fuerza que es capaz de sostener la mano en peso muerto, tal y como se sujeta, por ejemplo, una bolsa cargada. Este tipo de agarre requiere solo de la acción de los cuatro dedos distintos al pulgar. Esta fuerza depende directamente de la resistencia del hilo de pescar utilizado, así como del par de parada (en inglés, *stall torque*) de los micro-motores Pololu. El hilo de pescar ofrece una resistencia a la rotura hasta cargas de 46 kg. Los micro-motores ofrecen un par de parada de $12 \text{ kg} \cdot \text{cm}$. Ante la imposibilidad de realizar la prueba de rotura por limitación de existencias de actuadores, de la condición más restrictiva se extraerá la fuerza máxima de agarre.

Se aclara que el par de parada, o torque máximo, hace referencia al producto por la distancia, por lo que, aunque en las especificaciones de los micro-motores, se establezca como unidad el $\text{kg} \cdot \text{cm}$, ha de tenerse en cuenta que se trata de kilogramo fuerza, es decir, la fuerza sobre un peso de 1 kg en “gravedad terrestre estándar a nivel del mar”, que se estima 9.81 m/s , luego este valor se puede expresar como $117.72 \text{ N} \cdot \text{cm}$. Teniendo esto en consideración, y conociendo que la pieza del carrete del motor tiene un radio de 4.5 mm, se presentan los resultados de los cálculos pertinentes en la tabla 7.10.

Tabla 7.10: Fuerza máxima en agarre de carga de motores e hilo en TPMG90-2.

Elemento	Limitación	Fuerza máxima 1 dedo	Fuerza máxima 4 dedos
Hilo de pescar	46 kg	450.8 N	1803.2 N
Micro-motor	$117.72 \text{ N} \cdot \text{cm}$	261.6 N	1046.4 N

Puesto que también nos interesa conocer la fuerza que es capaz de imprimir la mano

en el agarre, se considera un agarre similar al agarre número 1 de la taxonomía de Cutkosky, que utilice los 5 dedos directamente apoyados en el objeto, para conocer esta magnitud. Para medir la fuerza de los cuatro dedos superiores, se realiza la medición como se muestra en la figura 7.12. La fuerza del dedo pulgar se mide individualmente con el resto de dedos extendido.

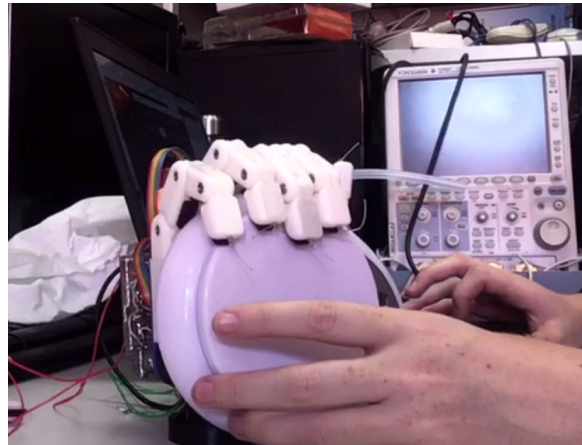


Figura 7.12: Ejecución de prueba de fuerza de agarre con TPMG90-2.

Se ha de tener en cuenta que el tipo de agarre mostrado en la figura superior ofrece unos resultados poco precisos, ya que, debido a la forma de la balanza y a la disposición de los dedos, no todos pueden aplicarla fuerza en una misma superficie de apoyo. Por lo tanto, como estos cuatro dedos son modulares y los actuadores idénticos entre ellos, en la tabla 7.11 se muestra el resultado de esta prueba ejecutada tal y como se muestra en la figura (útil para considerar tipos de agarres no regulares) y considerando la fuerza individual del dedo modular (valor que se marcará como fuerza de agarre).

Tabla 7.11: Fuerza de agarre distal máxima en TPMG90-2.

Tipo de medida	Dedos implicados	Resultado balanza (kg)	Fuerza (N)	Fuerza total (N)
Simultanea	4 dedos	0.690	6.762	4 dedos + pulgar = 8.82 N
	Pulgar	0.210	2.058	
Individual	1 dedo	0.301	2.950	4 * 1 dedo + pulgar = 13.86 N
	Pulgar	0.210	2.058	

Velocidad

La velocidad de las articulaciones que permiten la flexión de los dedos es accionada por los micro-motores Pololu HP 1000:1, que giran a 31 rpm o, lo que es lo mismo, 186 °/S. Por otra parte, la velocidad del servomotor, que nos permite la abducción del pulgar, es de 0.10 s/60° o, lo que es lo mismo, de 600 °/S.

La velocidad angular del servo se transmite directamente a la abducción, por lo cual se mantiene. La velocidad angular del micro-motor se transmite a las falanges a través de un sistema equivalente a un conjunto de poleas que modifican el sentido de la fuerza para así lograr el movimiento deseado en el dedo (ver figura 7.13). Encontramos poleas fijas (d'_1 , d'_2 , d'_3); semifijas, es decir, que no se mueven solidarias al hilo (d_2 , d_3 , d_4); y móvil conductora (d_1). Dado que en este tipo de poleas el rozamiento es elevado y la fuerza es equivalente a la resistencia, por lo que no hay ventaja mecánica.

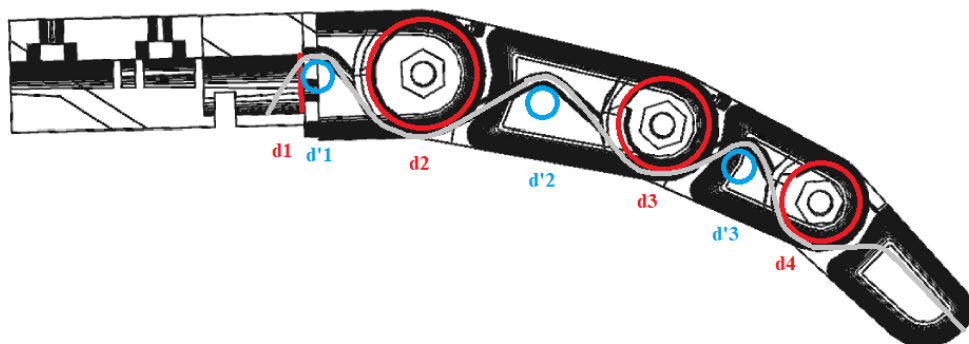


Figura 7.13: Mecanismo interno del módulo de dedo.

La velocidad de las articulaciones dependen de varios factores como la carga soportada, el rozamiento, la presión del ensamblaje o la tensión de alimentación. Para establecer una idea aproximada y muy general de la velocidad de cada una de las falanges de un dedo compuesto por las tres falanges, se analizan como poleas conductoras en el mismo sentido de giro (ecuación 7.3), estando el eje de la polea móvil girado 90° respecto a todos los demás.

$$\vec{v} = \vec{w}_1 \times \vec{r}_1 \quad (7.1)$$

$$\vec{v} = \vec{w}_2 \times \vec{r}_2 \quad (7.2)$$

$$\vec{w}_2 = \frac{\vec{w}_1 \times \vec{r}_1}{r_2} \quad (7.3)$$

Los valores de los diámetros considerados y de las velocidades calculadas se muestran en la tabla 7.12. Esta es tan solo una aproximación teórica. Los valores reales estarán por debajo de los mostrados en la tabla.

Tabla 7.12: Diámetros y velocidades angulares teóricas aproximadas del mecanismo del dedo de TPMG90-2.

Polea	Diámetro (mm)	Velocidad angular máxima (°/s)	Ratio de relación con w1
d1	4.50	186.00	1.00
d2	6.90	121.30	0.65
d3	5.85	143.08	0.77
d4	4.35	192.41	1.03

Hay que considerar que las articulaciones no se mueven independientemente, por lo que una aproximación más realista a la velocidad real de los dedos se consigue mediante una prueba real del movimiento de la falange proximal, partiendo de una prueba similar a la prueba de movimiento realizada para TPMG90-1⁵⁷. En esta prueba se mide el tiempo que tarda la falange proximal en recorrer 75° alimentando el circuito con 5 V. Se elige esta falange puesto que es la que inicia el movimiento y recorre 90° completos, por lo que facilita la medida y ofrecerá resultados más fiables. Los resultados se muestran en la tabla 7.13.

La tabla inferior (tabla 7.13) muestra un resultado de velocidad media de 72.47 °/s, lo que supone una reducción de un 40 % de la velocidad teórica estimada con anterioridad en la tabla 7.12. Este resultado es comprensible, debido a que la velocidad del motor no se transmite directamente a la falange, sino que la flexión se produce simultánea y gradualmente en todas las falanges, por lo que el tiempo que tardan en recorrer cierta distancia se realentiza. Por otra parte, se puede comprobar cómo la velocidad angular varía de un dedo a otro, a pesar de tratarse de piezas idénticas accionadas por motores idénticos. Esto se debe, en gran medida, a la presión que ejercen los tornillos que unen

⁵⁷J. J. Gago. Dextra TPMG90-2: Test movilidad, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=8FhTCyubnuA>. [Accedido: 16-05-2018]

las articulaciones. Esta presión debería ser calibrada para garantizar que todos los dedos se muevan a una velocidad similar.

Tabla 7.13: Velocidades angulares reales de la falange distal en los dedos de TPMG90-2.

Dedo	t P1 (s)	t P2 (s)	t P3 (s)	w P1 (°/s)	w P2 (°/s)	w P3 (°/s)	Media (°/s)
Índice	1.49	1.23	1.46	60.40	70.17	61.64	64.07
Corazón	1.13	1.09	1.19	79.65	82.57	75.63	79.28
Anular	1.11	1.13	1.16	81.08	79.65	77.59	79.44
Meñique	1.45	1.26	1.36	62.07	73.02	66.18	67.09
Media total							72.47

Flexión / extensión

Se ha de diferenciar dos tipos de flexión / extensión; la de los dedos de tres falanges (1-4) y la del dedo pulgar (5). Cada una muestra unos valores de flexión y extensión máximas distintos y, por lo tanto, los rangos difieren entre sí.

En la figura 7.14 se muestra la posición de un dedo de tres falanges completamente extendido. Se puede observar que las falanges, en este estado, no tienen sus ejes alineados, sino que existe una ligera inclinación entre una y otra.

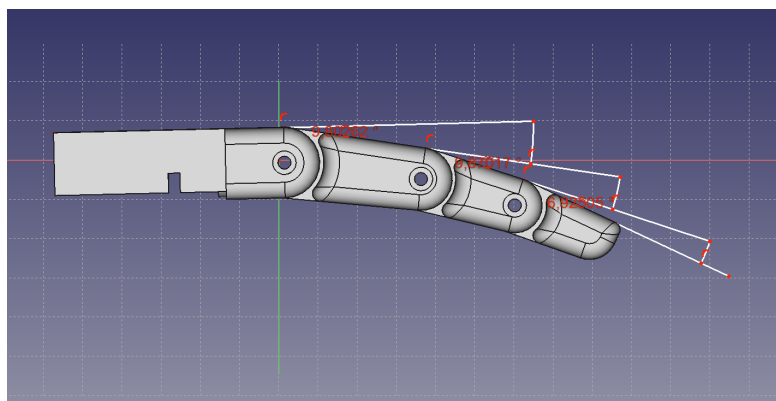


Figura 7.14: Ángulos de posición de dedo extendido.

El dedo completamente flexionado se muestra en la figura 7.15. Es notorio que los ángulos que forman las falanges entre sí son inferiores a 90° , por lo que se parte de la confirmación de que estos dedos son incapaces de reproducir rangos de flexión similares a los humanos (estimados en 100° según la información presentada en la tabla 7.9).

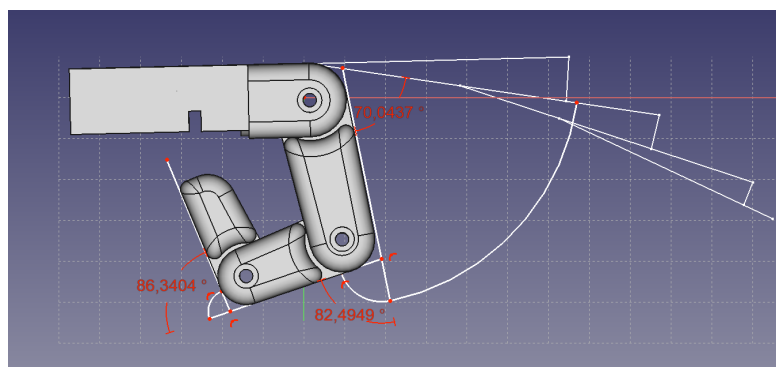


Figura 7.15: Ángulos de posición de dedo flexionado.

Para un estudio más exhaustivo, los ángulos medidos en estas dos configuraciones se reúnen en la tabla 7.14. El rango de flexión aumenta a medida que las falanges se separan de la palma, mas no es suficiente para que esta llegue a tocarla. En total, la falange distal es capaz de recorrer casi 250° desde su posición de extensión original. Son poco más de 20° los que separan a esta falange de cumplir con el rango de flexión humano, lo que, por otra parte, no dificulta el desarrollo de los agarres que se plantean en las taxonomías propuestas.

Tabla 7.14: Ángulos de flexión de los dedos con tres falanges.

Falange	Extendida respecto a la falange anterior ($^\circ$)	Extendida respecto a la horizontal ($^\circ$)	Flexionada respecto a la falange anterior ($^\circ$)	Flexionada respecto a la horizontal ($^\circ$)	Rango de flexión ($^\circ$)
Proximal	9.80	9.80	79.84	79.84	70.04
Media	9.87	19.67	82.50	162.34	72.63
Distal	6.92	26.59	86.34	248.68	79.42
Media del rango de flexión					74.03

Por otra parte, el dedo pulgar tiene una peculiaridad y es su gran capacidad de extensión desde su posición de reposo, en la que el eje de la falange proximal se sitúa paralelo al eje central del resto de dedos. Este dato se demuestra en la figura 7.16. La flexión permitida por este dedo no es fácilmente determinable, puesto que está limitada por contacto con la mano, y esta se produce de distinta forma según sea el valor de su ángulo de abducción. Los resultados del estudio de flexión del dedo aislado del resto de la mano, similares a los ofrecidos por las falanges proximal y distal de los dedos de tres falanges, no exponen información útil para este caso, puesto que son valores que se salen de rango de operación del dedo pulgar.

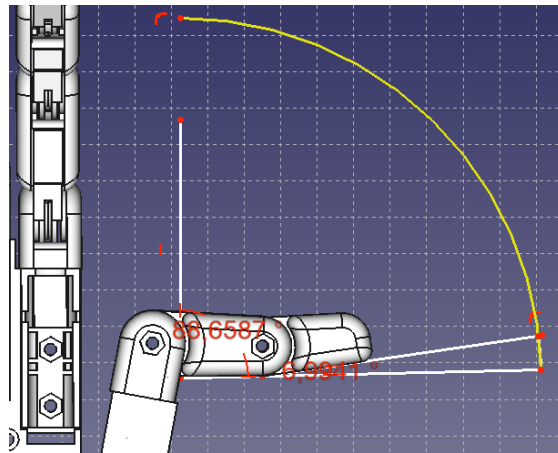


Figura 7.16: Ángulos de posición de pulgar extendido.

La tabla 7.15, presenta información sobre la capacidad de extensión del pulgar mediante el movimiento de sus dos falanges. La posición más extendida de este dedo puede provocar que se descoloque la goma que devuelve las articulaciones a su posición original, por lo que se desaconseja alcanzar dicho ángulo. El rango de extensión del pulgar supera al rango de flexión del resto de dedos, por lo que el rango de operación (extensión y flexión) del dedo pulgar es más cercano a los 100° de las articulaciones de la mano humana.

Tabla 7.15: Ángulos de extensión del pulgar desde posición vertical.

Falange	Flexión respecto a la falange anterior (°)	Extensión respecto a la vertical (°)	Rango de extensión (°)
Proximal	N/A	88.66	88.66
Distal	6.99	81.67	

7.3.5. Prueba CAN bus

Para probar el CAN bus, se conecta el transceptor a los pines TX y TR de Teensy y se alimenta con la tensión de salida de esta misma placa. Se conectan los terminales correspondientes a CANH, CANL y tierra al CAN bus de la muñeca de TEO. Para conocer la ubicación de los pines adecuados en el conector, se detecta la correspondencia entre el conector inicial (ver figura 7.17) y el final con un multímetro digital.

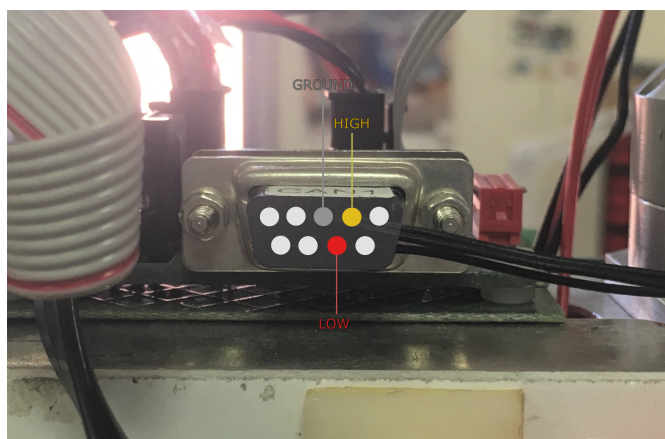


Figura 7.17: Conector CAN bus en TEO.

La prueba para comprobar la correcta comunicación mediante el CAN bus se realiza mediante un programa sencillo, basado en el test de *Teachop*⁵⁸ que escribe mediante Teensy un mensaje simple con múltiples marcos en el bus para probar la implementación de FlexCAN. La comunicación resulta exitosa. Se hace uso de las librerías de FlexCAN y Arduino.

7.4. Comparación y conclusiones

Las pruebas desarrolladas con TPMG90-1 han garantizado el correcto funcionamiento de la mano y su capacidad de realizar agarres similares a los necesarios para manipular textiles.

Los experimentos desarrollados con TPMG90-2 han permitido comprobar las capacidades de esta mano robótica. En primera instancia, se ha demostrado que es capaz de desarrollar más tipos de agarre de los establecidos con anterioridad, ejecutando correctamente 15 de 16 agarres en la taxonomía de agarre de Cutkosky y 13 de 15 tipos de manipulaciones en la taxonomía de manipulación de Bullock (además de 2 agarres específicos en mano). Estas pruebas han demostrado un alto control y destreza por parte de la mano, que puede realizar agarres estables contra deslizamientos y bastante estables contra cargas externas.

Las pruebas en TEO se han superado con éxito. Queda probado, por lo tanto, que el robot es capaz de adoptar las configuraciones necesarias para realizar sus tareas con

⁵⁸Teachop, CANtest for Teensy 3.1, 2014. [En línea] Disponible en: https://github.com/teachop/FlexCAN_Library/blob/master/examples/CANtest [Accedido: 12-05-2018]

textiles, pinceles y bandejas, entre otros, de forma eficaz y precisa.

Por otra parte, la prueba de antropomorfismo ha resultado esclarecedora para detectar los puntos fuertes y las carencias de la mano. A nivel estructural, la mano robótica es al rededor de un 20 % más ligera, su volumen es aproximadamente un 40 % inferior, sin tener en cuenta la electrónica integrada en el dorsal, y su rango de flexión es también ligeramente inferior. Estas limitaciones estructurales no restringen las habilidades de la mano necesarias para desarrollar las actividades para las que TEO está programado. Sin embargo, la diferencia del 95 % en fuerza de dos dedos y de casi el 100 % en sensorización, son, en conjunción, el principal inconveniente de TPMG90-2. Sería conveniente integrar sensores de presión / fuerza, que permitiesen a la mano regular la fuerza ejercida en relación a la presión, para así adaptar el agarre a distintos objetos.

Finalmente, se prueba que las comunicaciones por CAN bus funcionan correctamente, por lo que se puede concluir que la versión TPMG90-2 ha logrado el objetivo de convertir a TPMG90-1 en una mano completamente adaptada al robot humanoide TEO, gracias a sus mejoras en mecánica, electrónica y software.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

Se presentan a continuación las conclusiones extraídas de la elaboración de este trabajo en relación a los objetivos alcanzados, y se exponen las líneas de desarrollo futuras.

8.1. Conclusiones

Mediante este trabajo, se ha desarrollado una mano robótica adaptada al robot humanoide TEO. Para ello, se ha realizado un completo estudio del estado actual de la tecnología en el campo de las manos robóticas y de las necesidades de TEO en materia de manipulación. En base a ello, se han establecido los propósitos de este proyecto.

Se han realizado dos versiones de la mano; la primera, a modo de estudio experimental; la segunda, a modo de aplicación de las conclusiones extraídas del estudio previo. A nivel mecánico, la mano Dextra TPMG90-2 generada como versión final está adaptada al nuevo actuador de abducción del pulgar, posee una muñeca integrada que le permite ser atornillada a la muñeca de TEO y protege el terminal del tendón. A nivel electrónico, la mano se ajusta a las características de alimentación y comunicación del robot, y logra integrar la electrónica del circuito en el dorsal. A nivel software, el programa de control de la mano se adapta a la lógica de intercambio de información entre aplicaciones YARP y tiene en consideración la necesidad de establecer las comunicaciones mediante el CAN bus.

Como se expone en las conclusiones de los experimentos llevados a cabo con ambas versiones, las manos demuestran una muy buena respuesta a la reproducción de taxonomías de agarres y manipulación. El robot es capaz de desarrollar las tareas relacionadas con textiles, pintura, servicio con bandeja y otras funciones sociales exploradas en esta experimentación.

Una vez finalizado el proyecto, se concluye que los objetivos establecidos al inicio de este documento se han logrado satisfacer con éxito. La mano robótica actual cumple con las expectativas de destreza y antropomorfismo necesarias para cumplir con las tareas asignadas a TEO y se adapta correctamente a los requerimientos mecánicos, electrónicos y de software planteados.

8.2. Desarrollos futuros

Los desarrollos futuros relacionados con este proyecto se recogen a continuación en una serie de puntos temáticos.

■ Sensorización

Es fundamental dotar a estas manos de sensores de fuerza / presión, que permitan evaluar la posición adecuada de los dedos para evitar dañar los objetos manipulados, o la propia mano. Por lo tanto, uno de las principales líneas de desarrollos futuros es encontrar una forma viable de incorporar sensores de presión en los dedos de Dextra TPMG90-2.

■ Funciones de TEO

Se ha de realizar un completo estudio de las nuevas funciones que puede desarrollar TEO con las nuevas manos robóticas en su marco de asistencia doméstica. Acciones como pasar la aspiradora, manejar una escoba o servir bebidas, se presentan como nuevas posibilidades de ampliación de sus tareas elementales. El objetivo principal es que TEO sea capaz de desarrollar todas aquellas acciones que sean propias de un asistente del hogar.

■ Accesibilidad

Las manipulaciones sin contacto de la taxonomía de Bullock mostraron con anterioridad el potencial de la mano para trascender a las tareas de manipulación de objetos, adoptando funciones de comunicación como señalar, saludar o ejecutar el lenguaje de signos.

Una de las líneas de investigación que se abren con este proyecto, con el propósito de fomentar la accesibilidad en la robótica y permitir que TEO, como robot

asistencial, pueda comunicarse con personas con discapacidad auditiva, es la reproducción del lenguaje de signos.

- **Desarrollo software**

Mejoras pendiente en relación al software incluyen, por una parte, mejoras del controlador PID del programa, a nivel local y propioceptivo; por otra parte, el establecimiento de un lazo con visión en TEO, para así permitir que una comunicación con manipulación y, de este modo, generar una percepción por parte del robot que le indique qué posiciones, ángulos y trayectorias son adecuadas para el agarre.

Bibliografía

- [1] G. Metta, P. Fitzpatrick, and L. Natale. Yarp: Yet another robot platform. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 3, 2006.
- [2] D. Estevez, R. Fernandez-Fernandez, J. G. Victores, and C. Balaguer. Improving and evaluating robotic garment unfolding: A garment-agnostic approach. In *2017 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2017*, pages 210–215. IEEE, 2017.
- [3] D. Estevez, J. G. Victores, R. Fernandez-Fernandez, and C. Balaguer. Robotic ironing with 3D perception and force/torque feedback in household environments. In IEEE, editor, *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 2017-Septe, pages 6484–6489, Vancouver, BC, Canada, 2017. IEEE.
- [4] R. Fernandez-Fernandez, J. G. Victores, D. Estevez, and C. Balaguer. Robot Imitation through Vision, Kinesthetic and Force Features with Online Adaptation to Changing Environments. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018.
- [5] C. L. Taylor and R. J. Schwarz. The anatomy and mechanics of the human hand. *Artificial limbs*, 2, 1955.
- [6] M. Gabiccini, G. Stillfried, H. Marino, and M. Bianchi. A data-driven kinematic model of the human hand with soft-tissue artifact compensation mechanism for grasp synergy analysis. November 2013.
- [7] I. M. Bullock, R. R. Ma, and A. M. Dollar. A hand-centric classification of human and robot dexterous manipulation. *IEEE Transactions on Haptics*, 6, 2013.
- [8] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. Edin, L. Beccai, and C. Ciprian. Design of a cybernetic hand for perception and action. *Biological Cybernetics*, 95, 2006.
- [9] A. Schmitz, U. Pattacini, F. Nori, L. Natale, G. Metta, and G. Sandini. Design, realization and sensorization of a dextrous hand: The icub design choices; conference: Ieee-ras international conference on humanoid robots (humanoids 2010). 2010.

- [10] J. C. Díaz Montes and J.M. Dorador González. Memorias del xvi congreso internacional anual de la somim: El futuro de las prótesis de mano. September 2010.
- [11] J. M. Ramos Arreguín, J. E. Vargas Soto, and C. A. Ramos Arreguín. *Innovaciones en mecatrónica*. Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., 2017.
- [12] M. Grebenstein. *Approaching Human Performance. Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol 98. Springer, Cham, 2014.
- [13] A. Carmona Benjumea. Datos antropométricos de la población laboral española. *CNMP Sevilla. INSHT*, 14, 2001.
- [14] G. Schlesinger. *Der mechanische Aufbau der kunstlichen Glieder in Ersatzglieder und Arbeitshilfen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1919.
- [15] A. Bicchi. Hands for dexterous manipulation and robust grasping: a difficult road toward simplicity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16, 2000.
- [16] Z. Li, J. F. Canny, and S. S. Sastry. On motion planning for dexterous manipulation. i. the problem formulation. *Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation*, 3, 1989.
- [17] A. Okamura, N. Smaby, and M. R. Cutkosky. An overview of dexterous manipulation. *Proc. 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2000.
- [18] C. A. Klein and B. E. Blaho. Dexterity measures for the design and control of kinematically redundant manipulators. *The International Journal of Robotics Research*, 6, 1987.
- [19] R. H. Sturges. A quantification of machine dexterity applied to an assembly task. *The International Journal of Robotics Research*, 9, 1990.
- [20] M.R. Cutkosky. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 5, 1989.
- [21] J. C. Díaz Montes and J. M. Dorador González. Memorias del xv congreso internacional anual de la somim: Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano. September 2009.
- [22] W.F. Bolton. *MECATRÓNICA. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. S.A. Marcombo, 2010.
- [23] H. Nicholls and M. Lee. A survey of robot tactile sensing technology. *The International Journal of Robotics Research*, 8(3):3–30, 1989.
- [24] J. Quasdorf. A case study: Mr vs. hall effect for position sensing. *Sensors Magazine*, 2005.

- [25] A. Saudabayev and H. A. Varol. Sensors for robotic hands: A survey of state of the art. *IEEE Access*, 3, 2015.
- [26] L. Carrión, D. Ochoa, and J. A. Valverde. Analisis del funcionamiento del sensor de fuerza resistivo (fsr) con labview. March 2009.
- [27] H. Hasegawa, Y. Mizoguchi, K. Tadakuma, A. Ming, M. Ishikawa, and M. Shimojo. Development of intelligent robot hand using proximity, contact and slip sensing. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010.
- [28] H. Liua, D. YangEmail, S. Fan, and H. Cai. On the development of intrinsically-actuated, multisensory dexterous robotic hands. *ROBOMECH Journal*, 3(4):1–9, 2016.
- [29] T. Asfour, J. Schill, H. Peters, C. Klas, J. Bücker, C. Sander, S. Schulz, A. Kargov, T. Werner, and V. Bartenbach. Armar-4: A 63 dof torque controlled humanoid robot. *2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 95, 2013.
- [30] M. Controzzi, C. Cipriani, B. Jehenne, M. Donati, and M.C. Carrozza. Bio-inspired mechanical design of a tendon-driven dexterous prosthetic hand. *Annual international conference of the IEEE on engineering in medicine and biology society (EMBC)*, 2010.
- [31] M. C. Carrozza, G. Cappiello, S. Micera, B. B. Edin, L. Beccai, and C. Cipriani. Design of a cybernetic hand for perception and action. *Biol Cybern*, 95, 2006.
- [32] M. Chalon, A. Wedler, A. Baumann, W. Bertleff, A. Beyer, J. Butterfaß, M. Grebenstein, R. Gruber, F. Hacker, and E. Kraemer. Dexhand: A space qualified multi-fingered robotic hand. *IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, 2011.
- [33] A. Caffaz and G. Cannata. The design and development of the dist-hand dextrous gripper. *Proceedings, IEEE international conference on robotics and automation*, 1998.
- [34] G. Hirzinger, M. Fischer, B. Brunner, R. Koeppe, M. Otter, M. Grebenstein, and I. Schäfer. Advances in robotics: the dlr experience. *Int J Robot Res*, 18(11):2673–2678, 1999.
- [35] J. Butterfaß, M. Grebenstein, H. Liu, and G. Hirzinger. Dlr-hand ii: Next generation of a dextrous robot hand. *IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, 2001.
- [36] M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, T. Bahls, M. Chalon, O. Eiberger, W. Friedl, R. Gruber, S. Haddadin, U. Hagn, and R. Haslinger. The dlr hand arm system. *IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, 2011.

- [37] M. Mitchell and R. F. Weir. Development of a clinically viable multifunctional hand prosthesis. *Proceedings of the 2008 myoelectric controls/powered prosthetics symposium, Fredericton. IEEE, New Brunswick.*, 2008.
- [38] H. Kawasaki, T. Komatsu, and K. Uchiyama. Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu hand ii. *IEEE/AMSE Trans Mechatron*, 7(3):296–303, 2002.
- [39] T. Mouri, H. Kawasaki, K. Yoshikawa, J. Takai, and S. Ito. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand iii. *Proceedings of the 2002 IEEE international conference on autonomic and autonomous systems*, 7(3):1288–1293, 2002.
- [40] A. Namiki, Y. Imai, M. Kaneko, and M. Ishikawa. Development of a high-speed multifingered hand system. *Proceedings of the international conference on intelligent manipulation and grasping*, 2004.
- [41] A. Schmitz, U. Pattacini, F. Nori, L. Natale, G. Metta, and G. Sandini. Design, realization and sensorization of the dexterous icub hand. *10th IEEE-RAS international conference on humanoid robots (humanoids)*, 2010.
- [42] R. Weir, M. Mitchell, S. Clark, G. Puchhammer, M. Haslinger, R. Grausenburger, N. Kumar, R. Hofbauer, P. Kushnigg, and V. Cornelius. The intrinsic hand—a 22 degree-of-freedom artificial hand-wrist replacement. *Proceedings of the 2008 myoelectric controls/powered prosthetics symposium, Fredericton. IEEE, New Brunswick*, 2008.
- [43] E. H. Kim, S. W. Lee, and Y. K. Lee. A dexterous robot hand with a bio-mimetic mechanism. *Int J Precis Eng Manufactur*, 12(2):227–235, 2011.
- [44] J.P. Gazeau, S. Zeghloul, M. Arsicault, and J.P. Lallemand. The lms hand : force and position controls in the aim of the fine manipulation of objects. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2001.
- [45] MEKA. *H2 Compliant Hand*, 8 2015.
- [46] J. Ueda, M. Kondo, and T. Ogasawara. The multifingered naist hand system for robot in-hand manipulation. *Mech Mach Theory*, 45(2):224–238, 2010.
- [47] Y. Kurita, Y. Ono, A. Ikeda, and T. Ogasawara. Human-sized anthropomorphic robot hand with detachable mechanism at the wrist. *Mech Mach Theory*, 46(1):53–66, 2011.
- [48] T. Okada. Object-handling system for manual industry. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 9(2):79–89, 1979.
- [49] K. Hoshino and I. Kawabuchi. Pinching with finger tips in humanoid robot hand. *Proceedings, 12th IEEE international conference on Advanced robotics ICAR*, 2005.

- [50] C. Lovchik and M. A. Diftler. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. *Proceedings. 1999 IEEE international conference on robotics and automation*, 1999.
- [51] L. B. Bridgwater, C. A. Ihrke, M. A. Diftler, M. E. Abdallah, N. A. Radford, J. M. Rogers, S. Yayathi, R. S. Askew, and D. M. Linn. The robonaut 2 hand – designed to do work with tools. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2012.
- [52] Shadow Robot Company. *Shadow Dexterous Hand Technical Specification*, 8 2015.
- [53] M. T. Mason and J. K. Salisbury Jr. Robot hands and the mechanics of manipulation. *The MIT Press, Cambridge*, 1985.
- [54] H. Iwata and S. Sugano. Design of anthropomorphic dexterous hand with passive joints and sensitive soft skins. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, 2009.
- [55] C. Melchiorri and G. Vassura. Implementation of whole-hand manipulation capability in the ub hand system design. *Adv Robot*, 9(5):547–560, 1994.
- [56] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri. Development of ub hand 3: early results. *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, 2005.
- [57] F. Ficuciello¹, G. Palli², C. Melchiorri, and B. Siciliano. Experimental evaluation of the ub hand iv postural synergies. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011.
- [58] I. Yamano and T. Maeno. Five-fingered robot hand using ultrasonic motors and elastic elements. *Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation ICRA*, 2005.
- [59] M. G. Catalano, G. Grioli, A. Serio, E. Farnioli, C. Piazza, and A. Bicchi. Adaptive synergies for a humanoid robot hand. *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2012 12th, 2012.
- [60] S. C. Jacobsen, J. E. Wood, D. Knutti, and K. B. Biggers. The utah/mit dextrous hand: work in progress. *Int J Robot Res*, 3(4):21–50, 1985.
- [61] Z. H. Wang, L. B. Zhang, B. Gzj, S. M. Qian, and Q. H. Yang. Design and control of integrated pneumatic dexterous robot finger. *J Central South Univ Technol*, 18, 2011.
- [62] L. Suk-han, I. H. Suh, and K. Il Hong. *Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human*. LNCIS, 2008.

- [63] C. Melchiorri, G. Palli, G. Berselli, and G. Vassura. Development of the ub hand iv: Overview of design solutions and enabling technologies. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20, 2013.
- [64] P. Colmenares Soto. Propiedad intelectual. su marco jurídico y organizativo. *Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España. Segundo Seminario Regional sobre Propiedad Intelectual para Jueves y Fiscales de América Latina*, 2003.
- [65] Agencia Estatal Boletín del Estado. Código de propiedad intelectual, 2018.
- [66] Ministerio de Cultura de España. Real decreto legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de propiedad intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia, 1996.
- [67] Jefatura del Estado de España. Ley 24/2015, de 24 de julio, de patentes, 2015.
- [68] Comunidades Europeas. Directiva 2001/29/ce del parlamento europeo y del consejo, de 22 de mayo de 2001, relativa a la armonización de determinados aspectos de los derechos de autor y derechos afines a los derechos de autor en la sociedad de la información, 2001.
- [69] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Convenio de berna para la protección de las obras literarias y artísticas, 1979.
- [70] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Tratado de la ompi sobre derecho de autor (wct), 1996.
- [71] Organización Mundial de la Propiedad Intelectual. Tratado sobre el derecho de patentes, 2000.
- [72] N. Nevejans and European Parliament's Committee on Legal Affairs. European civil law rules in robotics, 2016.
- [73] M. J. Santos González. Regulación legal de la robótica y la inteligencia artificial: Retos de futuro. *Revista Jurídica de la Universidad de León*, 4, 2017.
- [74] Ministerio de Economía y Competitividad de España. Orden ecc/1333/2015, de 2 de julio, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de ayudas públicas del programa estatal de liderazgo empresarial en i+d+i, en el marco del plan estatal de investigación científica y técnica y de innovación 2013-2016., 2015.
- [75] ISO 8373:2012. Robots and robotic devices – Vocabulary. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2012.
- [76] ISO 9787:2013. Robots and robotic devices – Coordinate systems and motion nomenclatures. Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2013.

- [77] UNE-EN ISO 13482:2014. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots no industriales. Robots de asistencia personal no médicos.(ISO 13482:2014). Standard, Asociación Española de Normalización y Certificación, Génova, nº 6, 28004 Madrid, SP, 2014.
- [78] UNE-EN ISO 80000-1:2014. Magnitudes y unidades. Parte 1: Generalidades. (ISO 80000-1:2009 + Cor 1:2011). Standard, Asociación Española de Normalización y Certificación, Génova, nº 6, 28004 Madrid, SP, 2014.
- [79] UNE-EN ISO 80000-2:2013. Magnitudes y unidades. Parte 2: Signos matemáticos y símbolos matemáticos que se utilizan en las ciencias naturales y en la tecnología. (ISO 80000-2:2009). Standard, Asociación Española de Normalización y Certificación, Génova, nº 6, 28004 Madrid, SP, 2013.
- [80] UNE-EN ISO 80000-3:2013. Magnitudes y unidades. Parte 3: Espacio y tiempo. (ISO 80000-3:2006). Standard, Asociación Española de Normalización y Certificación, Génova, nº 6, 28004 Madrid, SP, 2013.
- [81] UNE-EN ISO 80000-4:2014. Magnitudes y unidades. Parte 4: Mecánica. (ISO 80000-4:2006). Standard, Asociación Española de Normalización y Certificación, Génova, nº 6, 28004 Madrid, SP, 2014.
- [82] Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. *Reglamento de organización de la asignatura Trabajo Fin de Grado para los Grados de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid con excepción del Doble Grado ADE-Informática en su opción integrada*. Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [83] Universidad Carlos III de Madrid. Capítulo cuatro: Gastos de Investigación, 2018.
- [84] M. Herryman Munilla and G. Blanco Carracedo. Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Cuba. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1):49–59, 2005.
- [85] General Electric. *Hammerhead™ Series; DC-DC Converter Power Modules*, 9 2013.
- [86] G. Girona García and J. M. García Haro. *Desarrollo de la comunicación USB para el robot TEO*. Bachelor's thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [87] M. Izquierdo Redín. *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Panamericana, 2008.
- [88] R. Kaye and S. Konz. Volume and surface area of the hand. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 30(4):382–384, 1986.

Apéndice A. Listados de componentes

Componentes Dextra TPMG90-1

Tabla A.1: Tabla de componentes de una unidad de mano Dextra TPMG90-1.

Tipo de componente	Descripción	Cantidad
Electrónica	Teensy 3.2	1
	Pololu 1000:1 HP Eje extendido	5
	Pololu DRV8838	5
	Encoder magnético para HP Pololu	5
	Servomotor TowerPro MG90	1
Tornillería	Tornillo M3x14	14
	Tornillo M3x16	2
	Tornillo M3x8	10
	Tornillo M3x6	1
	Separador Nylon M3x12	2
	Tuerca M3	26
Movimiento y actuación pasiva	Carrete de hilo de pescar (0.6 mm)	1
	Gomas 1.8"	14
Pines y conectores	Tira de 40 pines H-M acodados 2 mm	2
	Pines de 40 pines M-M rectos 2 mm	2
	Tira de 40 pines M-M rectos 2.54 mm	2

Tabla A.1 continúa de la página anterior

Tipo de componente	Descripción	Cantidad
	Conector banana 3 mm	2
Cables	Cable rojo 1.6 mm (0.5 m)	1
	Cable negro 1.6 mm (0.5 m)	1
	Cable USB - Nanocable	1
	Cable de red	1
Piezas impresas en PLA 1.75 mm	Falange distal	4
	Falange media	4
	Falange proximal	4
	Falange distal pulgar	1
	Falange proximal pulgar	1
	Contenedor del motor	4
	Contenedor del motor del pulgar	1
	Carrete del hilo de pescar	5
	Abductor TPMG90-1	1
	Palma TPMG90-1	1
	Dorsal TPMG90-1	1
Otros	Bobina de estaño (20 g)	1

Componentes Dextra TPMG90-2

Tabla A.2: Tabla de componentes de una unidad de mano Dextra TPMG90-2.

Tipo de componente	Descripción	Cantidad
Electrónica	Teensy 3.2	1
	Pololu 1000:1 HP Eje extendido	5
	Pololu DRV8838	5
	Encoder magnético para HP Pololu	5

Tabla A.2 continúa de la página anterior

Tipo de componente	Descripción	Cantidad
	Servomotor TowerPro MG90	1
	WaveShare SN65HVD230 CAN Board	11
	Convertidos DC/DC EHHD006A0B41Z	
Tornillería	Tornillo M3x14	16
	Tornillo M3x16	1
	Tornillo M3X12	1
	Tornillo M3X42	1
	Tornillo M3X20	1
	Tornillo M3x8	9
	Tornillo M3x6	1
	Separador Nylon M3x12	2
	Separador Nylon M3x14	2
	Tuerca M3	29
Movimiento y actuación pasiva	Carrete de hilo de pescar (0.6 mm)	1
	Gomas 1.8"	14
Pines y conectores	Tira de 40 pines H-M acodados 2 mm	2
	Pines de 40 pines M-M rectos 2 mm	2
	Tira de 40 pines M-M rectos 2.54 mm	2
	Conector banana 3 mm	2
	Tira de 40 zócalos rectos 2.52 mm	
Cables	Cable rojo 1.6 mm (0.5 m)	1
	Cable negro 1.6 mm (0.5 m)	1
	Cable plano 10 vías (1 m)	1

Tabla A.2 continúa de la página anterior

Tipo de componente	Descripción	Cantidad
	Cable USB - Nanocable	1
Piezas impresas en PLA 1.75 mm	Falange distal TPMG90-2	4
	Falange media	4
	Falange proximal	4
	Falange distal pulgar TPMG90-2	1
	Falange proximal pulgar	1
	Contenedor del motor	4
	Contenedor del motor del pulgar	1
	Carrete del hilo de pescar	1
	Abductor TPMG90-1	1
	Palma TPMG90-2	1
	Dorsal TPMG90-2	1
	Pieza adaptación muñeca TPMG90-2	1
	Muñeca TPMG90-2	1
Otros	Placa de puntos 100x160 mm (2.54)	1
	Lámina adhesiva antideslizante de caucho 4x15x15 mm	1
	Bobina de estaño (20 g)	1

Apéndice B. Coste de materiales de Dextra Original

Los precios mostrados en la tabla B.1 se muestran en dólares. Tomando una base de conversión de 0.84840 euro/dólar, válida para el periodo de 24 horas, con fecha fin el martes 8 de agosto de 2017 22:00 UTC⁵⁹, la cantidad total se traduce a 220.07 euros.

Tabla B.1: Análisis de costes de la mano original por Á. Villoslada.

Componente	Unidades	Precio Unidad	Precio Total
Micromotor paso a paso Pololu 1000:1 HP con eje extendido	5	\$23.95	\$119.75
DRV8838 DC Motor Driver Carrier	5	\$2.99	\$14.95
Encoder magnético Pololu para micromotores paso a paso	3 x 2 uds.	\$8.95	\$26.85
Turnigy TGY-EX5252MG Twin BB microservo digital	1	\$9.73	\$9.73
Teensy 3.1	1	\$19.80	\$19.80
Filamento PLA o ABS	750 g	\$21.60	\$21.60
Hilo de pescar (0.6 mm diameter)	1	\$8.90	\$8.90
Gomas de ortodoncia 1/8"	Bolsa de 100	\$5.49	\$5.49
Tornillos M3x14	Bolsa de 50	\$6.25	\$6.25
Tornillos M3x12	Bolsa de 50	\$7.53	\$7.53
Tornillos M3x8	Bolsa de 50	\$6.92	\$6.92
Tornillos M3x6	Bolsa de 50	\$5.42	\$5.42
Espaciadores M3x12	2	\$0.47	\$0.94
Tuercas M3	Bolsa de 100	\$5.26	\$5.26
Coste total			\$259,39

El precio de una mano completa es, en realidad, ligeramente menor que esta cifra,

⁵⁹OANDA Corporation. Conversor de divisas, 2018. [En línea] Disponible en: <https://www.oanda.com/lang/es/currency/converter/> [Accedido: 07-08-2017]

pues algunos componentes se venden en conjuntos y no por unidades. Este es el caso del filamento para imprimir (del cual solo se usa un 19 %), las piezas en 3D o los tornillos y tuercas, de los que se usa, aproximadamente, un 13 % (simplificación). Haciendo una estimación más realista al precio real:

$$\begin{aligned}
 PrecioTotal_{reducido} &= PrecioTotal_{original} - 1 \times PrecioEncoder \\
 &- 0,87 \times \sum PrecioTornillos\&Tuercas - 0,81 \times PrecioFilamento \Rightarrow \quad (B.1) \\
 PrecioTotal_{reducido} &= \$259,39 - \$4,48 - \$32,48 - \$17,49 \Rightarrow \\
 PrecioTotal_{reducido} &= \$204,55
 \end{aligned}$$

Se concluye que el coste real de materiales para la producción de una única mano robótica Dextra original es de \$204.55, o lo que es lo mismo⁵⁹, 173.54 €.

Apéndice C. Presupuesto desglosado del proyecto

1. **Autor:** JENNIFER JOANA GAGO MUÑOZ
2. **Institución:** UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
3. **Departamento:** DPTO. DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
4. **Descripción del proyecto:**
 - **Título:** DESARROLLO E INTEGRACIÓN DE MANO ROBÓTICA ANTROPOMÓRFICA EN EL ROBOT HUMANOIDE TEO
 - **Duración (meses):** 9
 - **Costes indirectos:** 20 %
5. **Presupuesto total del proyecto (Euro):** 10289.00
6. **Desglose presupuestario (costes directos):** Tabla C.1
7. **Costes totales:** Tablas C.1 C.2 y C.3

Tabla C.1: Costes en personal del proyecto.

Apellidos y Nombre	Categoría	Dedicación (horas)	Coste por hora (Euro)	Coste (Euro)
Gago Muñoz, Jennifer J.	Ingeniero Junior	300	15	4500
González Vítores, Juan C.	PhD. Ing. Senior	80	35	2800
Villoslada Peciña, Álvaro	Ingeniero Senior	28	25	700
Coste total				8000

Tabla C.2: Costes en equipos del proyecto.

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación (meses)	Coste imputable (Euro)
Impresora 3D Zmorph 2.0 SX	1500	30	3	60	22.50
Multiherramienta Dremel 3000	55.13	10	1	60	0.09
Ordenador Lenovo TP P51	1951	70	9	60	204.86
Soldador	25	50	4	60	0.83
Pistola termofusible	21	5	1	60	0.02
Multímetro digital	55	80	8	60	5.87
Báscula electrónica SANDA 4434	10	10	1	60	0.17
Fuente FAC-662-B	350	90	8	60	42.00
Placa de pruebas	5	50	5	60	0.21
40 cables puente M-M	1.13	50	5	60	0.05
Herramientas (genérico)	100	100	9	60	15.00
Coste total					291.60

Tabla C.3: Costes en materiales del proyecto.

Versión	Descripción	Cantidad	Coste unitario (Euro)	Coste (Euro)
TPMG90-1	Teensy 3.2	1	26.38	26.38
	Pololu 1000:1 HP Eje extendido	5	17.33	86.65
	Pololu DRV8838	5	2.37	11.85
	Encoder magnético para HP Pololu	5	4.45	22.25
	Servomotor TowerPro MG90	1	5.18	5.18
	Tornillo M3x14	14	0.04	0.56
	Tornillo M3x16*	2	0.04	0.08
	Tornillo M3x8*	10	0.04	0.40
	Tornillo M3x6	1	0.04	0.04
	Separador Nylon M3x12	2	0.12	0.24
	Tuerca M3	26	0.04	1.04
	Filamento azul PLA 1.75 mm (300 g)	1	7.99	7.99
	Filamento blanco PLA 1.75 mm (300 g)	1	7.99	7.99
	Carrete de hilo de pescar (0.6 mm)	1	10	10
	Bolsa de gomas 1.8"	1	5.95	5.95
	Cable de red*	1	1.99	1.99
	Tira de 40 pines H-M acodados 2 mm	2	1.55	3.10
	Pines de 40 pines M-M rectos 2 mm	2	1.55	3.10
	Tira de 40 pines M-M rectos 2.54 mm	2	1.55	3.10
	Cable rojo 1.6 mm (0.5 m)	1	0.55	0.55
	Cable negro 1.6 mm (0.5 m)	1	0.55	0.55
	Conector banana 3 mm	2	0.45	0.90
	Bobina de estaño (20 g)	1	1.5	1.5

Tabla C.3 continúa de la página anterior

Versión	Descripción	Cantidad	Coste unitario (Euro)	Coste (Euro)
	Cable USB - Nanocable	1	2.00	2.00
Precio total TPMG90-1				201.89
TPMG90-2	Placa de puntos 100x160 mm (2.54)	1	5.35	5.35
	Filamento negro PLA 1.75 mm (300 g)	1	7.99	7.99
	WaveShare SN65HVD230 CAN Board	1	12.86	12.86
	Convertidor DC/DC EHHD006A0B41Z	1	49.81	49.81
	Cable plano 10 vías (1 m)	2	1.29	2.58
	Tornillo M3X20	1	0.04	0.04
	Tornillo M3X42	1	0.04	0.04
	Tornillo M3X12	1	0.04	0.04
	Tornillo M3X14	2	0.04	0.08
	Tuerca M3	3	0.04	0.12
	Tira de 40 zócalos rectos 2.54 mm	2	1.55	3.10
	Separador Nylon M3x14	2	0.12	0.24
	Lámina adhesiva antideslizante de caucho 4x15x15 mm	1	0.25	0.25
Precio adicional TPMG90-2				84.00
Precio total TPMG90-2*				283.32
Precio total materiales				285.39

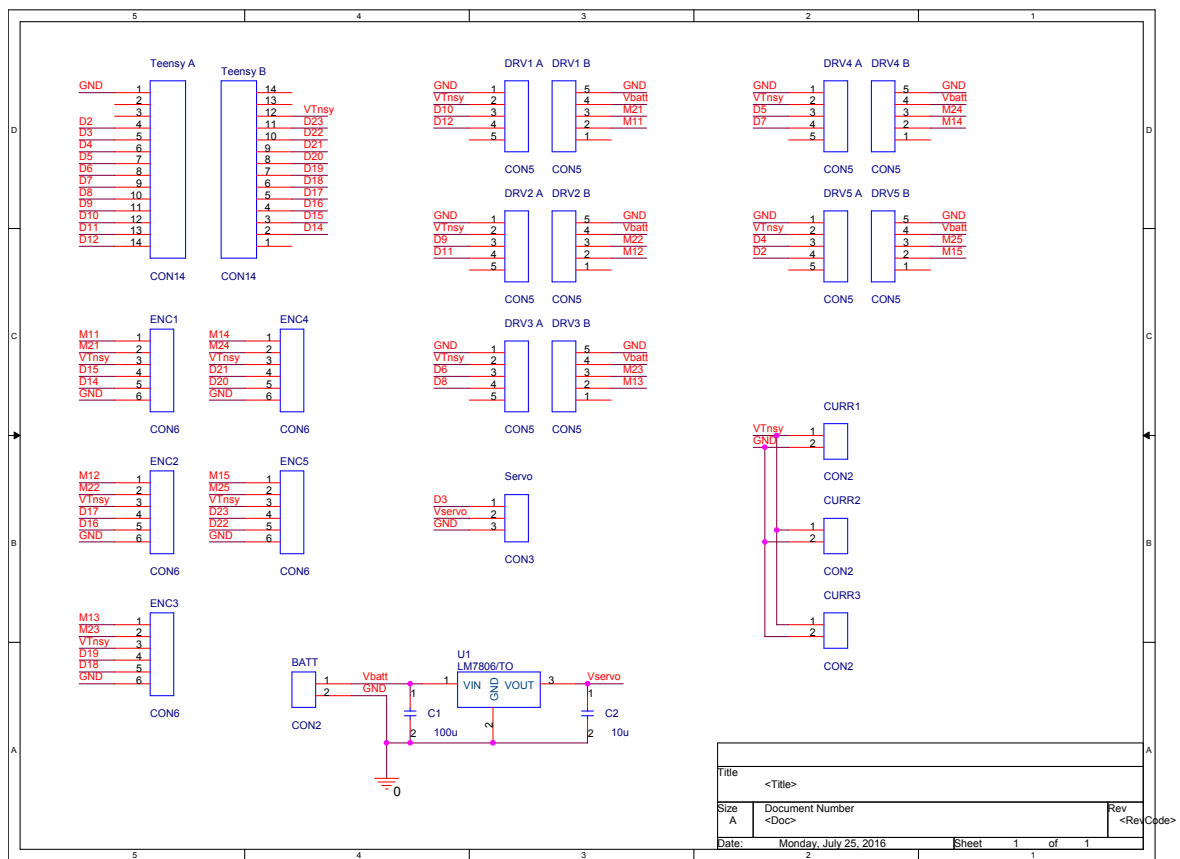
*Los materiales señalados no se incluyen en la misma cantidad en la versión TPMG90-2. El cable de red no se usa. De los tornillos M3X16 y M3X8 se usa una unidad menos.

Tabla C.4: Costes totales del proyecto.

Tipos de costes		Costes (Euro)
Costes directos	Personal	8000.00
	Equipos	291.60
	Materiales	285.39
Costes indirectos		1715.40
Total		10292.39

Apêndice D. Esquemático circuito electrónico

Esquemático Dextra Original



Esquemático Dextra TPMG90-1

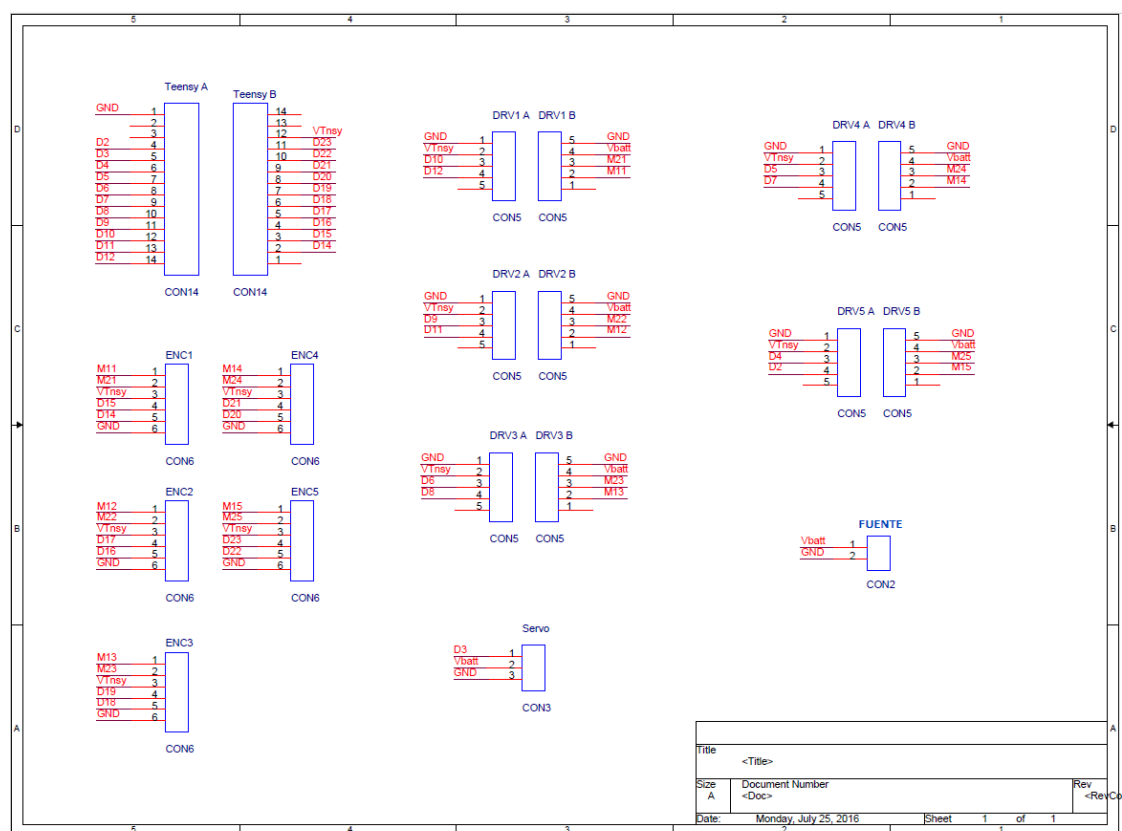


Figura D.2: Esquemático Dextra TPMG90-1

Esquemático Dextra TPMG90-2

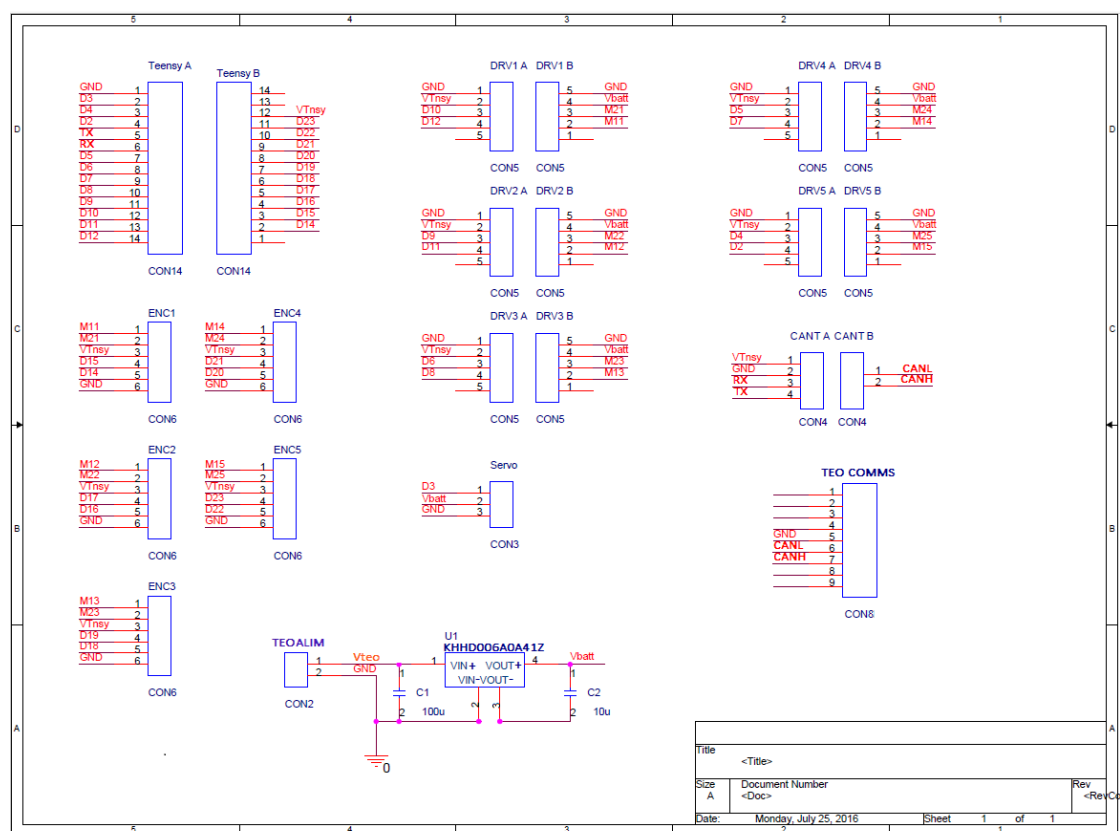


Figura D.3: Esquemático Dextra TPMG90-2